

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**SIMULACIÓN NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DE VÁLVULAS
DE BOMBAS DOSIFICADORAS ALTERNATIVAS**



Memoria, Presupuesto y Anexos

Autor:	Deus Botti, Tomás
Director:	Torres Cámara, Ricardo
Convocatoria:	Enero 2019

Resumen

Con la mejora de los sistemas de cálculo numérico y la facilidad de acceso al software que disponemos hoy en día, es posible llevar a cabo estudios en la rama de los elementos finitos con un grado de exactitud impensable hace unas décadas. Es por esto y gracias a las facilidades de acceso a la tecnología que nos brinda la universidad, que se puede llevar a cabo cálculos de gran complejidad numérica en minutos.

La intención de éste trabajo es el estudio de una válvula de bomba dosificadora alternativa mediante el método de los elementos finitos aplicados a la rama de la mecánica de los fluidos. Mediante el uso del software COMSOL Multiphysics se logra la preparación del modelo, el cálculo y su posterior post-proceso. En el pre-proceso se logra caracterizar la válvula y afinar los valores característicos para conseguir unos resultados más fiables en el siguiente paso, el cálculo. En el cálculo nos basamos en las teorías de elementos finitos y la mecánica de fluidos computacional desarrollada desde la década de los 50 del siglo pasado. Esto sumado a la capacidad computacional de los procesadores actuales nos brinda resultados de cálculos con una alta exactitud en minutos. Por último, encontramos el post-proceso donde podemos encontrar de manera intuitiva los resultados de los cálculos.

Una vez realizadas las simulaciones se ha creado una aplicación para el aprendizaje didáctico del software COMSOL Multiphysics en las aulas de la facultad. Ésta aplicación fue ideada con la capacidad de introducir de manera sencilla a los alumnos de las asignaturas de la rama de fluidos y de elementos finitos en el mundo del cálculo computacional.

Resum

Amb la millora dels sistemes de càlcul numèric i la facilitat d'accés al software de què disposem avui en dia, és possible dur a terme estudis a la branca dels elements finits amb un grau d'exactitud impensable fa unes dècades. És per això i gràcies a les facilitats d'accés a la tecnologia que ens brinda la universitat que es poden dur a terme càlculs de gran complexitat numèrica en minuts.

La intenció d'aquest treball és l'estudi d'una vàlvula de bomba dosificadora alternativa mitjançant el mètode dels elements finits aplicats a la branca de la mecànica de fluids. Mitjançant l'ús del software COMSOL Multiphysics s'aconsegueix la preparació del model, el càlcul i el seu posterior post-procés.

Al pre-procés s'aconsegueix caracteritzar la vàlvula i afinar els valors característics per obtenir uns resultats més fiables al següent pas, el càlcul. Al càlcul ens basem en les teories d'elements finits i la mecànica de fluids computacional desenvolupada des de la dècada dels 50 del segle passat. Això sumat a la capacitat computacional dels processadors actuals ens proveeix els resultats amb una alta exactitud en un temps breu. Per últim, ens trobem el post-procés, on podem trobar de manera intuïtiva els resultats dels càlculs.

Una vegada realitzades les simulacions s'ha creat una aplicació per a l'aprenentatge didàctic del software COMSOL Multiphysics a les aules de la facultat. Aquesta aplicació fou ideada amb la capacitat d'introduir de manera senzilla als alumnes de les assignatures de la branca de fluids i d'elements finits al món del càlcul computacional.

Abstract

With the improvement of the numerical calculation systems and the ease of access to the software that we have today, it is possible to carry out studies in the branch of finite elements with a high degree of accuracy. Thanks to the access facilities to the technology that the university provides us, large numerical calculations can be carried out in minutes.

The intention of its use is the study of an alternative metering pump valve by the finite element method applied to the branch of fluid mechanics. Using COMSOL Multiphysics software the preparation of the model, the calculation and its subsequent post-processing can be carried out.

In the pre-process, it is possible to characterize the valve and the characteristic values to achieve more reliable results in the next step, the calculation. In the calculation, we rely on the theories of finite elements and computational fluid mechanics developed since the 50's of the last century. This added to the computational capacity of current processors give the results of calculations with high precision in a short period of time. Finally, we find the post-process where we can get those results in an intuitive way.

Once the simulations have been carried out, an application has been created for the educational learning of the COMSOL Multiphysics software in the faculty's classrooms. This application was designed with the ability to easily introduce students to the subjects of the branch of fluids and finite elements in the world of computational calculation.



Agradecimientos

A mi familia por el apoyo moral sin el cual no habría podido llevar a buen puerto éste trabajo.

A Marina Peris por su apoyo incondicional en los momentos de desánimo y sus acertados consejos en lo referido a la confección y redacción de la memoria.

A Ricardo Torres y a la escuela por el apoyo y la guía en los momentos de duda. Sin el soporte y los medios que me facilitó la universidad, éste trabajo hubiera llegado a ser lo que es.





Glosario

MEF – Método de Elementos Finitos

MFC – Mecánica de Fluidos Computacional

CFD – Computational Fluid Dynamic

Nodo – Unidad elemental en el MEF. Punto de evaluación de las incógnitas del sistema.

Elemento – Unidad resultante de la unión de 2 nodos en 2D y de 3 en 3D.

Malla – Unión de nodos a partir de la formación de elementos. Abarca toda la geometría a estudio.

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 – Machón (Fuente: propia)	11
Ilustración 2 – Anillo tórico (Fuente: propia)	11
Ilustración 3 – Bola (Fuente: propia)	12
Ilustración 4 - Junta Tórica (Fuente: propia)	12
Ilustración 5 – Tope de Bola (Fuente: propia)	12
Ilustración 6 – Explosionado (Fuente: propia)	13
Ilustración 7 – Dominio del fluido (Fuente: propia)	16
Ilustración 8 – Perfil de velocidades en régimen laminar (Fuente: Mecánica de fluidos, Frank M. White, 5ª Ed)	17
Ilustración 9 – Entrada de fluido (Fuente: propia)	17
Ilustración 10 – Salida de fluido (Fuente: propia)	18
Ilustración 11 – Malla extremadamente gruesa (Fuente: propia)	19
Ilustración 12 – Malla extremadamente fina (Fuente: propia)	19
Ilustración 13 – Configuración Parametric Sweep (Fuente: propia)	20
Ilustración 14 – Resultados de caudal volumétrico $Y_POS_BOLA = 0$, 3 velocidades y 9 tamaños de malla (Fuente: propia)	21
Ilustración 16 – Presión YZ según $P = 4000 \text{ Pa e}$	26
Ilustración 15 – Presión YZ según $P = 4000 \text{ Pa e}$	26
Ilustración 17 – Selección de parámetros de válvula en SolidWorks (Fuente: propia)	29
Ilustración 18 – Geometría $LONG_DIAM_ANILLO$ (Fuente: propia)	30
Ilustración 19 – Geometría RAD_BOLA (Fuente: propia)	30
Ilustración 20 – RAD_ANILLO (Fuente: propia)	31

Il·lustració 21 – Franja principal de la aplicació (Fuente: propia)	32
Il·lustració 22 – Sección de sincronización (Fuente: propia)	33
Il·lustració 23 – Sección de parámetros (Fuente: propia)	34
Il·lustració 24 – Sección de gràfics (Fuente: propia)	35
Il·lustració 25 – Corte UO Y_POS_BOLA=8E-4 P= 3000 Pa (Fuente: propia)	57
Il·lustració 26 – Corte UO Y_POS_BOLA=4E-4 P= 3000 Pa (Fuente: propia)	57
Il·lustració 27 – Corte UO Y_POS_BOLA=0 P=3000 Pa (Fuente: propia)	57
Il·lustració 28 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3000 Pa (Fuente: propia)	58
Il·lustració 29 – Corte Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)	58
Il·lustració 30 – Corte UO Y_POS_BOLA=0.0012 P=3000 Pa (Fuente: propia)	58
Il·lustració 31 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P= 3000 Pa (Fuente: propia)	59
Il·lustració 32 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3000 Pa (Fuente: propia)	59
Il·lustració 33 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3000 Pa (Fuente: propia)	59
Il·lustració 34 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)	60
Il·lustració 35– P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3000 Pa (Fuente: propia)	60
Il·lustració 36– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3000 Pa (Fuente: propia)	61
Il·lustració 37– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)	61
Il·lustració 38– P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3000 Pa (Fuente: propia)	62
Il·lustració 39 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)	62
Il·lustració 40 – Corte UO Y_POS_BOLA=0 P=3125 Pa (Fuente: propia)	63
Il·lustració 41 – Corte UO Y_POS_BOLA=0.0012 P=3125 Pa (Fuente: propia)	64
Il·lustració 42 – Corte UO Y_POS_BOLA=8E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)	64

Il·lustració 43 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)	64
Il·lustració 44 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)	65
Il·lustració 45- P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3125 Pa (Fuente: propia)	65
Il·lustració 46 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3125 Pa (Fuente: propia)	65
Il·lustració 47 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3125 Pa (Fuente: propia)	66
Il·lustració 48 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3125 Pa (Fuente: propia)	66
Il·lustració 49 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)	66
Il·lustració 50 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)	67
Il·lustració 51 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3125 Pa (Fuente: propia)	67
Il·lustració 52 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3125 Pa (Fuente: propia)	68
Il·lustració 53 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)	68
Il·lustració 54 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3125 Pa (Fuente: propia)	69
Il·lustració 57 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P= 3250 Pa (Fuente: propia)	70
Il·lustració 55 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3250 Pa	70
Il·lustració 56 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)	70
Il·lustració 58 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3250 Pa (Fuente: propia)	71
Il·lustració 59 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3250 Pa (Fuente: propia)	71
Il·lustració 60 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3250 Pa (Fuente: propia)	71
Il·lustració 61 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)	72
Il·lustració 62 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)	72
Il·lustració 63 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3250 Pa (Fuente: propia)	72
Il·lustració 64 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3250 Pa (Fuente: propia)	73

Ilustración 65 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3250 Pa (Fuente: propia)	73
Ilustración 66 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)	74
Ilustración 67 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)	74
Ilustración 68 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3250 Pa (Fuente: propia)	75
Ilustración 69 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3250 Pa (Fuente: propia)	75
Ilustración 70 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3375 Pa (Fuente: propia)	76
Ilustración 71 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3375 Pa (Fuente: propia)	77
Ilustración 72 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)	77
Ilustración 73 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)	77
Ilustración 74 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)	78
Ilustración 75 – P lineal Y_POS_BOLA= 0 P=3375 Pa (Fuente: propia)	78
Ilustración 76 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3375 Pa (Fuente: propia)	78
Ilustración 77 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3375 Pa (Fuente: propia)	79
Ilustración 78 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3375 Pa (Fuente: propia)	79
Ilustración 79 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)	79
Ilustración 80 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)	80
Ilustración 81 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3375 Pa (Fuente: propia)	80
Ilustración 82 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3375 Pa (Fuente: propia)	81
Ilustración 83 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3375 Pa (Fuente: propia)	81
Ilustración 84 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)	81
Ilustración 85 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3500 Pa (Fuente: propia)	82
Ilustración 86- Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3500 Pa (Fuente: propia)	83

Il·lustració 87 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)	83
Il·lustració 88 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)	83
Il·lustració 89 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3500 Pa (Fuente: propia)	84
Il·lustració 90 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)	84
Il·lustració 91 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3500 Pa (Fuente: propia)	84
Il·lustració 92 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3500 Pa (Fuente: propia)	85
Il·lustració 93 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3500 Pa (Fuente: propia)	85
Il·lustració 94 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)	85
Il·lustració 95 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)	86
Il·lustració 96 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3500 Pa (Fuente: propia)	86
Il·lustració 97 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3500 Pa (Fuente: propia)	87
Il·lustració 98 – P YZ Y_POS_BOLA= 8E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)	87
Il·lustració 99 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3500 Pa (Fuente: propia)	88
Il·lustració 100– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)	89
Il·lustració 101– Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)	89
Il·lustració 102 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3625 Pa (Fuente: propia)	89
Il·lustració 103– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3625 Pa (Fuente: propia)	90
Il·lustració 104 – P Lineal Y_POS_BOLA=0 P=3625 Pa (Fuente: propia)	90
Il·lustració 105– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3625 Pa (Fuente: propia)	90
Il·lustració 106– P Lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3625 Pa (Fuente: propia)	91
Il·lustració 107 – P Lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)	91
Il·lustració 108– P Lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)	91

Ilustración 109 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3625 Pa (Fuente: propia)	92
Ilustración 110 – P Lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3625 Pa (Fuente: propia)	92
Ilustración 111– P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)	93
Ilustración 112– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)	93
Ilustración 113– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3625 Pa (Fuente: propia)	94
Ilustración 114 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3625 Pa (Fuente: propia)	94
Ilustración 115 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3750 Pa (Fuente: propia)	95
Ilustración 116– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3750 Pa (Fuente: propia)	96
Ilustración 117– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)	96
Ilustración 118– Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)	96
Ilustración 119 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)	97
Ilustración 120 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3750 Pa (Fuente: propia)	97
Ilustración 121 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3750 Pa (Fuente: propia)	97
Ilustración 122– P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3750 Pa (Fuente: propia)	98
Ilustración 123 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3750 Pa (Fuente: propia)	98
Ilustración 124 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)	98
Ilustración 125– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)	99
Ilustración 126 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3750 Pa (Fuente: propia)	99
Ilustración 127 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3750 Pa (Fuente: propia)	100
Ilustración 128 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)	100
Ilustración 129 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3750 Pa (Fuente: propia)	101
Ilustración 130 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3875 Pa (Fuente: propia)	102

Il·lustració 131 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)	102
Il·lustració 132– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3875 Pa (Fuente: propia)	103
Il·lustració 133 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3875 Pa (Fuente: propia)	103
Il·lustració 134– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)	103
Il·lustració 135– P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)	104
Il·lustració 136– P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)	104
Il·lustració 137 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3875 Pa (Fuente: propia)	104
Il·lustració 138– P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3875 Pa (Fuente: propia)	105
Il·lustració 139 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3875 Pa (Fuente: propia)	105
Il·lustració 140– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)	106
Il·lustració 141 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3875 Pa (Fuente: propia)	106
Il·lustració 142– P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3875 Pa (Fuente: propia)	107
Il·lustració 143– P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)	107
Il·lustració 144– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3875 Pa (Fuente: propia)	108
Il·lustració 145 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)	109
Il·lustració 146– Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)	109
Il·lustració 147 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=4000 Pa (Fuente: propia)	109
Il·lustració 148 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=4000 Pa (Fuente: propia)	110
Il·lustració 149– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=4000 Pa (Fuente: propia)	110
Il·lustració 150– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=4000 Pa (Fuente: propia)	110
Il·lustració 151 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=4000 Pa (Fuente: propia)	111
Il·lustració 152 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)	111

Ilustración 153– P lineal $Y_POS_BOLA=4E-4$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	111
Ilustración 154 – P YZ $Y_POS_BOLA=0$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	112
Ilustración 155– P lineal $Y_POS_BOLA=0.0016$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	112
Ilustración 156– P YZ $Y_POS_BOLA=8E-4$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	113
Ilustración 157– P YZ $Y_POS_BOLA=4E-4$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	113
Ilustración 158– P YZ $Y_POS_BOLA=0.0012$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	114
Ilustración 159 – P YZ $Y_POS_BOLA=0.0016$ $P=4000$ Pa (Fuente: propia)	114
Ilustración 160 – Corte U0 $Y_POS_BOLA=0$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	115
Ilustración 161– Corte U0 $Y_POS_BOLA=0.0012$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	116
Ilustración 162– Corte U0 $Y_POS_BOLA=8E-4$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	116
Ilustración 163– Corte U0 $Y_POS_BOLA=4E-4$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	116
Ilustración 164– P lineal $Y_POS_BOLA=4E-4$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	117
Ilustración 165 – P lineal $Y_POS_BOLA=0$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	117
Ilustración 166– Corte U0 $Y_POS_BOLA=0.0016$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	117
Ilustración 167– P lineal $Y_POS_BOLA=8E-4$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	118
Ilustración 168 – P lineal $Y_POS_BOLA=0.0012$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	118
Ilustración 169– P lineal $Y_POS_BOLA=0.0016$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	118
Ilustración 170– P YZ $Y_POS_BOLA=4E-4$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	119
Ilustración 171 – P YZ $Y_POS_BOLA=0$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	119
Ilustración 172– P YZ $Y_POS_BOLA=0.0012$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	120
Ilustración 173– P YZ $Y_POS_BOLA=8E-4$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	120
Ilustración 174– P YZ $Y_POS_BOLA=0.0016$ $P=4125$ Pa (Fuente: propia)	121

Il·lustració 175– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)	122
Il·lustració 176– Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)	122
Il·lustració 177 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=4250 Pa (Fuente: propia)	122
Il·lustració 178 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=4250 Pa (Fuente: propia)	123
Il·lustració 179– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=4250 Pa (Fuente: propia)	123
Il·lustració 180– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=4250 Pa (Fuente: propia)	123
Il·lustració 181– P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=4250 Pa (Fuente: propia)	124
Il·lustració 182– P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)	124
Il·lustració 183– P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)	124
Il·lustració 184 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=4250 Pa (Fuente: propia)	125
Il·lustració 185– P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=4250 Pa (Fuente: propia)	125
Il·lustració 186 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)	126
Il·lustració 187– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)	126
Il·lustració 188– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=4250 Pa (Fuente: propia)	127
Il·lustració 189 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=4250 Pa (Fuente: propia)	127

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 – Pérdida de presión (Fuente: Apuntes Mecánica de Fluidos, Ricardo Torres)	5
Ecuación 2 – Número de Reynolds (Fuente: Apuntes Mecánica de Fluidos, Ricardo Torres)	15
Ecuación 3 – Consumo total de energía (Fuente: propia)	36
Ecuación 4 – Emisiones totales de CO ₂ en kilogramos (Fuente: propia)	36

Índice de tablas

Tabla 1 – Parámetros de estudio (Fuente: propia)	14
Tabla 2 – Variable de agua (Fuente: propia)	15
Tabla 3 – Relación de tamaños de malla (Fuente: propia)	18
Tabla 4 – Tiempos de cálculo según tamaño de malla (Fuente: propia)	21
Tabla 5 – Reynolds IN – OUT P = 3000 Pa (Fuente: propia)	27
Tabla 6 – Reynolds IN – OUT P = 4250 Pa (Fuente: propia)	28
Tabla 7 – Agrupación de datos sobre consumo energético y emisiones totales (Fuente: propia)	36
Tabla 8 – Costes energéticos totales (Fuente: propia)	40
Tabla 9 – Precios de licencias (Fuente: propia)	40
Tabla 10 – Coste total del proyecto (Fuente: propia)	41
Tabla 11 – Datos completo cálculo de convergencia (Fuente: propia)	53
Tabla 12 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3000 Pa (Fuente: propia)	56
Tabla 13 – P IN – OUT P= 3000 Pa (Fuente: propia)	56
Tabla 14 – U0 IN – OUT P= 3000 Pa (Fuente: propia)	56
Tabla 15 – Caudal Volumétrico IN-OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)	63
Tabla 16 – P IN-OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)	63
Tabla 17 – U0 IN-OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)	63
Tabla 18 – P IN – OUT P=3250 Pa (Fuente: propia)	69
Tabla 19 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3250 (Fuente: propia)	69
Tabla 20 – U0 IN – OUT P=3250 Pa (Fuente: propia)	69
Tabla 21 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3375 Pa (Fuente: propia)	76

Tabla 22 – P IN – OUT P=3375 Pa (Fuente: propia)	76
Tabla 23 – U0 IN – OUT P=3375 Pa (Fuente: propia)	76
Tabla 24 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3500 Pa (Fuente: propia)	82
Tabla 25 – P IN – OUT P=3500 Pa (Fuente: propia)	82
Tabla 26 – U0 IN – OUT P= 3500 Pa (Fuente: propia)	82
Tabla 27 – U0 IN – OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)	88
Tabla 28 – P IN – OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)	88
Tabla 29 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)	88
Tabla 30 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3750 Pa (Fuente: propia)	95
Tabla 31 – P IN – OUT P=3750 Pa (Fuente: propia)	95
Tabla 32 – U0 IN – OUT P=3750 Pa (Fuente: propia)	95
Tabla 33 – P IN – OUT P=3875 Pa (Fuente: propia)	101
Tabla 34 – U0 IN – OUT P=3875 Pa (Fuente: propia)	101
Tabla 35 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3875 Pa (Fuente: propia)	102
Tabla 36 – U0 IN – OUT P=4000 Pa (Fuente: propia)	108
Tabla 37 – P IN – OUT P=4000 Pa (Fuente: propia)	108
Tabla 38 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=4000 Pa (Fuente: propia)	108
Tabla 39 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=4125 Pa (Fuente: propia)	115
Tabla 40 – P IN – OUT P=4125 Pa (Fuente: propia)	115
Tabla 41 – U0 IN – OUT P=4125 Pa (Fuente: propia)	115
Tabla 42 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=4250 Pa (Fuente: propia)	121
Tabla 43 – P IN – OUT P=4250 Pa (Fuente: propia)	121

Tabla 44 – U0 IN – OUT P=4250 Pa (Fuente: propia)	121
Tabla 45 – Reynolds IN - OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)	129
Tabla 46 – Reynolds IN - OUT P= 3500 Pa (Fuente: propia)	129
Tabla 47 – Reynolds IN - OUT P= 3375 Pa (Fuente: propia)	129
Tabla 48 – Reynolds IN - OUT P= 3250 Pa (Fuente: propia)	129
Tabla 49 – Reynolds IN - OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)	129
Tabla 50 – Reynolds IN - OUT P=3000 Pa (Fuente: propia)	129
Tabla 51 – Reynolds IN - OUT P= 4250 Pa (Fuente: propia)	130
Tabla 52 – Reynolds IN - OUT P= 4125 Pa (Fuente: propia)	130
Tabla 53 – Reynolds IN - OUT P= 4000 Pa (Fuente: propia)	130
Tabla 54 – Reynolds IN - OUT P= 3875 Pa (Fuente: propia)	130
Tabla 55 – Reynolds IN - OUT P= 3750 Pa (Fuente: propia)	130

Índice de gráficas

Gráfico 1 - Convergencia de caudal másico para Y_POS_BOLA = 0 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	21
Gráfico 2 – Convergencia de caudal volumétrico según posición y tiempo de cálculo (Fuente: propia)	22
Gráfico 3 – Presiones IN según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)	24
Gráfico 4 – Caudal Volumétrico OUT según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)	25
Gráfico 5 – Velocidad OUT según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)	25
Gráfico 6 – Presiones OUT según Y_POS_BOLA y presión IN (Fuente: propia)	26
Gráfico 7 – Factor K según presiones e Y_POS_BOLA (Fuente: propia)	27
Gráfico 8 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 4.0 E-04 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	54
Gráfico 9 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 8.0 E-04 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	54
Gráfico 10 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 0 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	54
Gráfico 11 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 0,0012 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	55
Gráfico 12 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 0,0016 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	55
Gráfico 13 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 0,002 a diferentes velocidades (Fuente: propia)	55
Gráfico 15 – Caudal Volumétrico OUT según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)	128
Gráfico 14 – Velocidad IN según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)	128

Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XVII
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XXI
1. PREFACIO	1
Origen del trabajo.....	1
Motivación	1
2. INTRODUCCIÓN	3
Objetivos del trabajo	3
Alcance del trabajo	3
Descripción del trabajo realizado.....	3
3. MECÁNICA DE FLUIDOS	4
3.1. Conservación de la masa y de la cantidad de movimiento.....	4
3.2. Primer y segundo principio de la termodinámica.....	4
3.3. Hipótesis de medio continuo.....	4
3.4. Partícula Fluida	4
3.5. Pérdida de carga	5
4. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	7
4.1. CFD	7
5. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CÁLCULO	9
5.1. Hardware	9
5.2. Software.....	9

5.2.1.	Software libre	9
5.2.2.	Software comercial.....	9
6.	COMSOL MULTIPHYSICS	10
6.1.	Módulos	10
6.2.	Requisitos del sistema	10
7.	GEOMETRÍA	11
8.	CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES DE ESTUDIO	14
8.1.	Parámetros de estudio.....	14
8.1.1.	Y_POS_BOLA.....	14
8.1.2.	Presión de entrada (P).....	14
8.1.3.	Reynolds (Re).....	15
8.2.	Librería de materiales	15
8.3.	Módulo Fluid Flow	16
8.3.1.	Propiedades del fluido.....	16
8.3.2.	Pared.....	17
8.3.3.	Secciones de entrada y salida del flujo	17
8.4.	Módulo de malla	18
9.	ESTUDIO DE CONVERGENCIA	20
9.1.	Ejemplo de cálculo de convergencia	20
9.2.	Resultados del estudio de convergencia	22
10.	CÁLCULO POR PRESIÓN	23
10.1.	Configuración	23
10.2.	Resultados	24
11.	SINCRONIZACIÓN COMSOL-SOLIDWORKS	29
12.	APLICACIÓN PARA ESTUDIO	32
12.1.	Ventana principal	32
12.2.	Declaraciones	33
12.3.	Métodos	33
12.4.	Formularios	33
12.4.1.	Sincronización.....	33
12.4.2.	Parámetros	34
12.5.	Gráficos	34

13. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	36
CONCLUSIONES	37
PRESUPUESTO ECONÓMICO	40
BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXO A – PLANOS	45
ANEXO B – CÁLCULO DE CONVERGENCIA	51
ANEXO C – CÁLCULO POR PRESIÓN	56
ANEXO D – GUÍA APLICACIÓN COMSOL	131

1. Prefacio

Origen del trabajo

Parametrizar una válvula de bomba dosificadora mediante el uso de software de resolución por MEF. Conocer sus características intrínsecas y brindar un complemento de aprendizaje didáctico a los estudiantes de la universidad. Todo esto sin dejar de banda el hecho de aprender a usar desde cero un programa de cálculo y simulación por elementos finitos.

Motivación

Desde el principio encontré el tema muy interesante. El hecho de haber trabajado anteriormente con otros programas de elementos finitos como ANSA a nivel profesional me daba un conocimiento previo que pude aprovechar. Por otro lado, estaba muy interesado en ampliar mis conocimientos dentro del área de la ingeniería de fluidos.

A lo largo del desarrollo del trabajo, mi conocimiento sobre el uso del programa fue incrementando y con ello mis ganas de sacarlo adelante. La idea de hacer una aplicación para que futuros estudiantes pudieran aprender rápidamente del uso de ésta fantástica herramienta de software fue un hecho clave para darle un toque lectivo a todo el trabajo.

2. Introducción

Objetivos del trabajo

El objetivo de éste trabajo es realizar un estudio exhaustivo de las características de la válvula “60-808.X-P Válvula aspiración manguera 3-4” al ser atravesada por un fluido en diferentes regímenes y características de flujo. Todo esto mediante el uso del software COMSOL Multiphysics.

A nivel personal, considero que usar un software completamente desconocido comporta un aprendizaje del uso del mismo. El provecho que le pueda sacar en el futuro al conocimiento adquirido en todo el proceso es muy valioso. Tener la responsabilidad de llevar adelante un proyecto individualmente también es una idea motivadora.

Alcance del trabajo

El alcance del trabajo es realizar una simulación numérico-computacional de válvulas de bombas dosificadoras alternativas mediante el software COMSOL Multiphysics. La aplicación de ámbito educativo será creada mediante un módulo de COMSOL y la parametrización necesaria para variar la geometría de la válvula se hará mediante el software de dibujo CAD SOLIDWORKS.

Descripción del trabajo realizado

El trabajo se ha realizado con el propósito de concluir satisfactoriamente los objetivos siguientes en orden cronológico:

- Familiarización con el programa COMSOL Multiphysics mediante guías y tutoriales.
- Adecuación de parámetros de la válvula en el programa.
- Estudio de convergencia.
- Cálculos de válvula.
- Evaluación de resultados.
- Parametrización en SOLIDWORKS y enlace SOLIDWORKS-COMSOL.
- Creación de aplicación.

Para realizar éste trabajo se han requerido conocimientos de mecánica de fluidos, programación elemental y elementos finitos. A parte del conocimiento de los programas COMSOL y SOLIDWORKS.

3. Mecánica de Fluidos

Es la rama de la física comprendida dentro de la mecánica de medios continuos que estudia el movimiento de los fluidos, así como las fuerzas que lo provocan. En la mecánica de fluidos se asume que los fluidos verifican diferentes leyes e hipótesis. (Wikipedia 2017) (Fontanals 2013)

3.1. Conservación de la masa y de la cantidad de movimiento

Es una magnitud física fundamental de tipo vectorial que describe el movimiento de un cuerpo. En mecánica clásica, la cantidad de movimiento se define como el producto de la masa del cuerpo y su velocidad en un instante determinado.

Para calcular la cantidad de movimiento en un fluido que se mueve según un campo de velocidades es necesario sumar la cantidad de movimiento de cada partícula del fluido, es decir, de cada diferencial de masa o elemento infinitesimal.

3.2. Primer y segundo principio de la termodinámica

- Primer principio de la termodinámica: Un sistema aislado puede intercambiar energía con su entorno en forma de trabajo y de calor, acumulando energía en forma de energía interna.
- Segundo principio de la termodinámica: La entropía del universo siempre tiende a aumentar, es decir, no es posible un proceso cuyo único resultado sea la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.

3.3. Hipótesis de medio continuo

La hipótesis del medio continuo es la hipótesis fundamental de la mecánica de fluidos y en general de toda la mecánica de medios continuos. En esta hipótesis se considera que el fluido es continuo a lo largo del espacio que ocupa, ignorando por tanto su estructura molecular y las discontinuidades asociadas a esta. Con esta hipótesis se puede considerar que las propiedades del fluido (densidad, temperatura, etc.) son funciones continuas.

3.4. Partícula Fluida

Este concepto está muy ligado al del medio continuo y es sumamente importante en la mecánica de fluidos. Se llama partícula fluida a la masa elemental de fluido que en un instante determinado se

encuentra en un punto del espacio. Dicha masa elemental ha de ser lo suficientemente grande como para contener un gran número de moléculas, y lo suficientemente pequeña como para poder considerar que en su interior no hay variaciones de las propiedades macroscópicas del fluido, de modo que en cada partícula fluida podamos asignar un valor a estas propiedades. Es importante tener en cuenta que la partícula fluida se mueve con la velocidad macroscópica del fluido, de modo que está siempre formada por las mismas moléculas. Así pues, un determinado punto del espacio en distintos instantes de tiempo estará ocupado por distintas partículas fluidas.

3.5. Pérdida de carga

Pérdida de presión que se produce a lo largo del recorrido de un fluido debido a la fricción de las partículas entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce.

$$\Delta P = K \cdot Q^2$$

Ecuación 1 – Pérdida de presión (Fuente: Apuntes Mecánica de Fluidos, Ricardo Torres)

Donde,

ΔP – incremento de presión.

K – coeficiente de pérdidas. Se halla de forma empírica.

Q – Caudal volumétrico que circula por la sección a estudio. Se utiliza dicho caudal dada su condición de continuidad a lo largo de la geometría.

4. Método de los Elementos Finitos

El método de los elementos finitos proviene del campo de análisis de estructuras. El concepto de elemento tiene su origen en las técnicas usadas en el cálculo de esfuerzos en los que una estructura es subdividida en pequeñas subestructuras de varias formas y reensambladas posteriormente después de que cada elemento haya sido analizado. El desarrollo de esta técnica y su elaboración formal es lo que hoy en día se conoce como método de los elementos finitos (MEF). La expresión en sí misma fue introducida por *Clough (1960)*.

Después de haber sido un método aplicado a una amplia variedad de problemas estructurales tanto lineales como no lineales, se vio pronto que el método podía ser usado para resolver problemas de medios continuos en general (Zienkiewicz and Cheung, 1965). Desde entonces el MEF se ha convertido en un método de aproximación de soluciones numéricas de problemas físicos descritos por ecuaciones de campo en medios continuos y en la actualidad contiene muchos de los esquemas de diferencias finitas como casos especiales.

El MEF se basa en las siguientes etapas:

- La discretización del espacio en elementos contiguos de formas arbitrarias típico de mallas no estructuradas. De hecho, los MEF son particularmente apropiados para mallas no estructuradas.
- Define en cada elemento una representación paramétrica de las variables incógnita basadas en las denominadas funciones de forma o de interpolación asociadas con cada elemento.
- Define una formulación integral de las ecuaciones que deben ser resueltas en cada elemento del espacio discretizado.

Éste método está basado en la definición de ciertos valores funcionales asociados a los nodos de la malla donde el valor numérico de las funciones incógnita (y eventualmente de sus derivadas) deben ser determinadas. El número total de incógnitas nodales son los denominados grados de libertad. (Capua 2007)

4.1. CFD

Dinámica de Fluidos Computacional, de las siglas en inglés Computational Fluid Dynamics, es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza los MEF y demás algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de un fluido. En el caso del CFD se discretizará el volumen de fluido en nodos

y todos ellos formarán elementos tridimensionales. Dichos elementos pueden ser tetraedros, ortoedros, etc. En concreto, mediante los CFD se estudian corrientes de flujo, transferencias de calor y otros procesos físicos relacionados. Trabaja resolviendo las ecuaciones de transporte de fluido a través de una región de interés con unas condiciones en el contorno de la región especificada. (Wikipedia 2017)

5. Componentes del sistema de cálculo

Los tiempos de simulación y la eficacia de los softwares para resolver las ecuaciones es lo que marca la facilidad con la que las máquinas actuales pueden desarrollar el cálculo por elementos finitos. Para llevar a cabo el trabajo se ha requerido del uso de unas máquinas con ciertas prestaciones. Pudiéndose correr las simulaciones en ordenadores que simplemente cumplan los requisitos mínimos de los programas más exigentes es, superando éste requisito, cuando los tiempos de cálculo se acortan.

5.1. Hardware

Se utilizaron para los cálculos dos ordenadores. Uno personal y un servidor facilitado por la universidad.

El sistema personal está configurado con un procesador AMD A10-6800k a 4.10 GHz y 16 GB de memoria RAM.

El servidor provisto por la universidad está configurado con un procesador Intel i7-5960X y 4 GB de memoria RAM.

5.2. Software

El software utilizado se ha diferenciado en software libre y comercial, siendo éste segundo grupo el que incluye los programas de ingeniería.

5.2.1. Software libre

- Parallels Client: Programa de conexión gráfica a escritorio remoto.
- WinSCP: Programa de transferencia de archivos entre dispositivos.
- Putty: Programa de conexión a IP remotas. Procura un establecimiento de conexión estable sobre la que se basa Parallels Client para trabajar.

5.2.2. Software comercial

- COMSOL Multiphysics: Software de cálculo por elementos finitos. (Ver Apartado 6)
- SolidWorks: Software de diseño por CAD.
- Microsoft Office: Plataforma de ofimática para creación de archivos de texto y cálculo.

6. COMSOL Multiphysics

Programa de cálculo por elementos finitos de origen sueco creado en 1986. Distribuido a nivel mundial, tiene una amplia base de usuarios. Actualmente cubre sectores de cálculo tales como electricidad, estructura mecánica y acústica, fluidos, calor y reacciones químicas. Está diseñado para funcionar de manera intuitiva con una selección muy amplia de parámetros, permitiendo la interoperabilidad entre las diferentes físicas para poder trabajar de manera simultánea acoplándolas y así conseguir una mayor semejanza entre el estudio y la realidad. El trabajo se ha llevado a cabo en la versión 5.3a del programa. Dicho dato es de relevancia para poder abrir los archivos en el futuro y prever incompatibilidades.

6.1. Módulos

COMSOL dispone de aproximadamente 40 módulos diferentes entre físicas y métodos de conexión y más de 700 tipos de estudio diferente. Las conexiones se llevan a cabo mediante un sistema llamado LiveLink®. Éste sistema permite conectar COMSOL, de una manera muy eficaz, con otros softwares típicos de ingeniería tales como Matlab, SOLIDWORKS, AutoCAD, Excel, etc.

En éste trabajo se han usado los módulos siguientes:

- COMSOL Multiphysics: Módulo general del programa. Agrupa al resto de módulos.
- CFD Module: Módulo de estudios de fluidos. Dentro del mismo se encuentra el submódulo de régimen laminar utilizado en éste caso.
- CAD Import Module: Módulo de importación para piezas CAD en diferentes formatos.
- LiveLink® for SolidWorks: Módulo de conexión directa a SolidWorks.
- Material Library: Modulo de cartas de material.
- App Builder: Módulo de creación de aplicaciones para simulación.

6.2. Requisitos del sistema

Con el objetivo de repetir éste trabajo en óptimas condiciones y para el correcto funcionamiento del programa en su versión de escritorio 5.3a, son necesarias las características siguientes: 4GB de memoria RAM, de 2 a 10 GB de espacio en el disco duro (según en número de módulos a instalar), procesador Intel o AMD con arquitectura de 64 bits, Windows 7 o superior, lector de PDF y conexión a internet.

7. Geometría

La válvula “60-808.X-P Válvula aspiración manguera 3-4” está formada por 5 piezas.

- Machón: Pieza central del ensamblaje. Aloja en su interior al resto de componentes y es el encargado de la conexión con la manguera que introduce el flujo de agua en la válvula.



Ilustración 1 – Machón (Fuente: propia)

- Anillo tórico: Aloja la junta tórica. Se encuentra al inicio del paso del flujo.

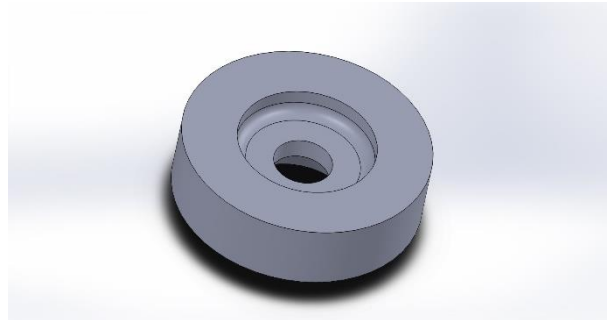


Ilustración 2 – Anillo tórico (Fuente: propia)

- Bola: Pieza principal en el mecanismo para abrir y cerrar la válvula. Encaja entre la junta tórica y el tope bola. Tiene un recorrido disponible de 2 mm entre una pieza y la otra.

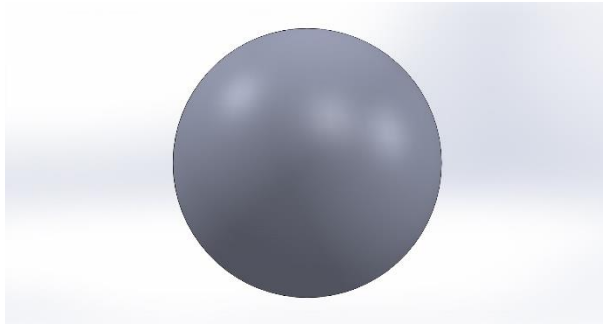


Ilustración 3 – Bola (Fuente: propia)

- Junta tórica: Alojada en el anillo tórico. Cuando entra en contacto con la bola genera un cierre de válvula perfecto, impidiendo el paso de fluido. El resto del tiempo es simplemente un aspecto más de la geometría que el flujo ha de sortear.



Ilustración 4 - Junta Tórica (Fuente: propia)

- Tope de bola: Pieza alojada al final de la válvula. Da salida al flujo según las condiciones creadas durante su recorrido a lo largo de todo el ensamblaje. Es la pieza encargada de guiar a la bola desde la posición de válvula totalmente cerrada a la de totalmente abierta.

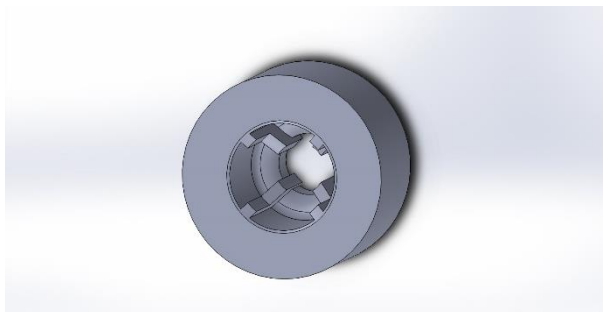


Ilustración 5 – Tope de Bola (Fuente: propia)

- Ensamblaje final explosionado: Se puede observar el ensamblaje con las piezas en orden según el paso del flujo las atravesaría de atrás a delante.

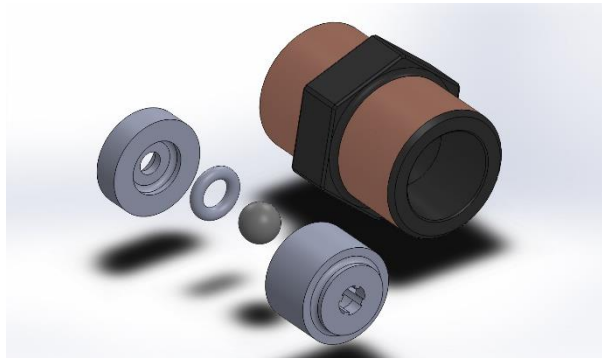


Ilustración 6 – Explosionado (Fuente: propia)

Los planos acotados y con vistas interiores se encuentran al final del trabajo. (Ver Anexo A)

8. Condiciones de contorno e iniciales de estudio

8.1. Parámetros de estudio

Para poder llevar a cabo la parametrización de la válvula y sus posteriores cálculos habrá que seleccionar ciertos parámetros, éstos condicionarán a posteriori los resultados obtenidos. Dichos valores deben manejarse con cuidado ya que pueden generar falsos resultados. Un ejemplo claro es llevar a cabo el cálculo con un Reynolds superior a 2300 en el valor de velocidad de entrada del flujo. Éste valor es considerado el máximo en un estudio de flujo laminar según COMSOL. Tanto el módulo como el submódulo seleccionados son exclusivamente para régimen laminar. Si se asume régimen turbulento a la entrada, habría que seleccionar el submódulo de COMSOL correspondiente. Al no hacerlo, el programa puede generar resultados desviados de la realidad.

Se intentó reducir el número de parámetros a una cantidad manejable. A mayor número de parámetros mayor control de la válvula pero también mayor volumen de datos a manejar. Se prefirió tener un número de parámetros inferior y poder controlarlos mejor, sacándoles así mayor partido. Los parámetros iniciales de variación de la válvula son los siguientes:

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Y_POS_BOLA		0	Pos Bola
Re	$1000[\text{kg}/\text{m}^3] \cdot U_0 \cdot 0.02[\text{m}] / 0.001[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	200	Reynolds
P	3000[Pa]	3000	Presión de entrada

Tabla 1 – Parámetros de estudio (Fuente: propia)

8.1.1. Y_POS_BOLA

Único parámetro geométrico entre los usados tanto en el estudio de convergencia como en los cálculos para el estudio por velocidades. Tiene valores entre 0 m y 0,002m haciendo saltos de 0,0004 m. Define la posición de la bola a lo largo del recorrido del flujo sobre el eje Y. El valor 0 m corresponde a la posición de válvula completamente abierta. El valor 0,002m corresponde a la posición de válvula completamente cerrada, donde la bola encaja perfectamente con la junta tórica y bloquea el paso de flujo. Es uno de los parámetros más importantes del estudio, sino el más importante.

8.1.2. Presión de entrada (P)

Indica el valor de la presión a la entrada de la región de estudio. Marca la presión con unos valores impuestos. En el caso del presente estudio se ha hecho variar desde 3000 Pa hasta 4250 Pa. Este hecho nos permite controlar, mediante una característica tan fundamental en todos los fluidos, el

funcionamiento total del sistema. Se supone una manguera conectada a la entrada de la válvula, es por esto que se exige una presión constante marcada por dicho parámetro.

8.1.3. Reynolds (Re)

Número que caracteriza el movimiento de un fluido indicando su turbulencia o laminaridad. En éste caso no se puede editar directamente, sino a través del conocimiento de los valores de velocidad a entrada y salida. El número de Reynolds está definido por la densidad del flujo, su velocidad, la sección de entrada y la viscosidad dinámica. El Reynolds asumido tanto a la entrada como a la salida de la válvula considerará el diámetro interno de la boca en ambas secciones. El diámetro a la entrada es de 0,02 m y el diámetro de salida es de 0,005 m. (Fontanals 2013)

$$Re = \frac{\rho \cdot U0 \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot U0 \frac{m}{s} \cdot D m}{0,001 Pa \cdot s}$$

Ecuación 2 – Número de Reynolds (Fuente: Apuntes Mecánica de Fluidos, Ricardo Torres)

8.2. Librería de materiales

El programa dispone de un módulo de materiales con un amplio catálogo de posibilidades. En el caso que nos toca se ha escogido como fluido agua a temperatura de 20°C. La temperatura no es excesivamente relevante más allá que para permitir al programa extraer ciertos valores de tablas y gráficas necesarios de la carta de material. La carta de material referente al agua aporta muchos más datos de los que ésta simulación requiere. A parte de datos numéricos, la carta incorpora gráficas de las cuales se extraen ciertas variables en función de temperatura, presión, etc.

El material del cual está hecha la válvula es desconocido. Esto no afecta al buen funcionamiento de las simulaciones dado que el sistema considera éste sólido como infinitamente rígido. Si se requiriera un estudio mediante el módulo de mecánica de sólidos se debería solucionar esta incógnita.

Description	Value
Dynamic viscosity	eta(T[1/K])[Pa*s]
Ratio of specific heats	1.0
Electrical conductivity	{{5.5e-6[S/m], 0, 0}, {0, 5.5e-6[S/m], 0}, {0, 0, 5.5e-6[S/m]}}
Heat capacity at constant pressure	Cp(T[1/K])[J/(kg*K)]
Density	rho(T[1/K])[kg/m^3]
Thermal conductivity	{{k(T[1/K])[W/(m*K)], 0, 0}, {0, k(T[1/K])[W/(m*K)], 0}, {0, 0, k(T[1/K])[W/(m*K)]}}
Speed of sound	cs(T[1/K])[m/s]
Density	rho(T[1/K])[kg/m^3]

Tabla 2 – Variable de agua (Fuente: propia)

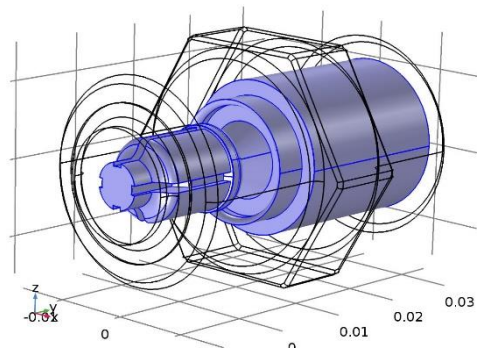
- eta: Viscosidad dinámica, en el caso de agua 0,001 Pa·s
- Cp: calor específico a presión constante

- ρ : Densidad del agua, en éste caso 1000 kg/m^3
- k : conductividad térmica. Irrelevante en éste estudio ya que no se usará el módulo de transferencia de calor.
- c_s : Velocidad del sonido en el material. Irrelevante en éste estudio ya que no se está calculando nada referente al mismo.

Todas estas funciones son extraídas de tablas internas del material para su mayor precisión en el momento de hacer el cálculo.

8.3. Módulo Fluid Flow

Seleccionando el submódulo de flujo laminar, tenemos acceso a todos los parámetros que podemos necesitar para el cálculo de la válvula. El submódulo se compone de diferentes apartados. En el submenú se seleccionará el dominio dentro del cual circulará el flujo de agua.



Il·lustració 7 – Dominio del fluido (Fuente: propia)

8.3.1. Propiedades del fluido

Se tratará el flujo de agua como incompresible y de régimen estacionario. Sus propiedades físicas no varían en el tiempo. Se dotará al sistema con una presión de referencia de 100 Pa en el interior, 0 Pa a la salida y una temperatura de referencia de 20°C. Tanto la densidad como la viscosidad dinámica se extraerán de la carta de material.

8.3.2. Pared

Se determinará como pared todas aquellas superficies colindantes al flujo de agua. Estas superficies prohibirán al flujo que las atraviesen y lo contendrán retenido. En dichas superficies la velocidad $u(r)$ será de 0 m/s, sin deslizamiento. Se consideraran paredes todas las superficies incluidas en el submódulo de fluid flow excepto las superficies de entrada y de salida de fluido.

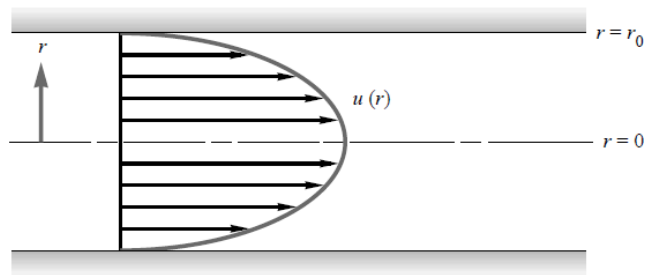


Ilustración 8 – Perfil de velocidades en régimen laminar (Fuente: Mecánica de fluidos, Frank M. White, 5ª Ed)

8.3.3. Secciones de entrada y salida del flujo

Las secciones de entrada y salida del fluido en la válvula están señaladas en las fotos siguientes:

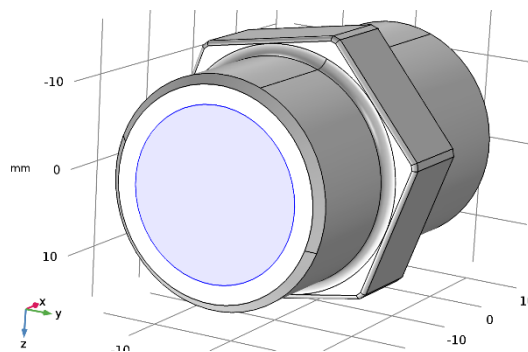


Ilustración 9 – Entrada de fluido (Fuente: propia)

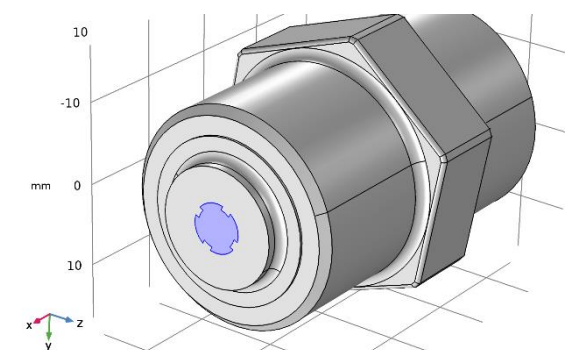


Ilustración 10 – Salida de fluido (Fuente: propia)

8.4. Módulo de malla

El módulo de malla lleva a cabo la discretización del medio continuo. Así se conseguirá generar los nodos y elementos, entidades básicas del estudio por MEF. El tiempo de cálculo y la exactitud de los valores resultado del mismo dependen en gran medida de éste submódulo.

Éste apartado requiere los parámetros de malla y el tipo de elemento que conformarán la misma. En lo referente al tamaño de malla, COMSOL pone a disposición del usuario 9 tamaños de malla ya creados o la posibilidad de generar una malla diferente introduciendo manualmente los valores de tamaño máximo y mínimo de elemento, su tasa de crecimiento, el factor de curvatura y la resolución de regiones estrechas. A menor tamaño de malla, mayor tiempo requiere el programa para generarla. Por otra parte, los elementos quedarán generados por tetraedros dada su versatilidad para ajustarse a geometrías 3D.

Nº nodos	Nº de elementos	Tamaño de malla		Tamaño de malla
		Mínimo (m)	Máximo (m)	
27959	10206	0,00223	0,0105	Extremadamente Gruesa
30612	10714	0,159	0,00638	Extra gruesa
32346	11114	0,00128	0,00415	Más gruesa
35934	11856	9,57E-04	0,00319	Gruesa
42085	13232	6,38E-04	0,00214	Normal
51304	15458	3,19E-04	0,00169	Fina
106059	29948	1,28E-04	0,00118	Más Fina
290604	68724	4,78E-05	7,34E-04	Extra Fina
593461	124664	6,38E-06	4,15E-04	Extremadamente Fina

Tabla 3 – Relación de tamaños de malla (Fuente: propia)

Las opciones de editado de malla que COMSOL ofrece son limitadas pero están bien descritas y permiten tener versatilidad a la hora de generar mallas con características especiales. La forma de malla será no estructurada y tetraédrica, ya que no se ha dado al programa mayores instrucciones sobre su estructura. (COMSOL Multiphysics 2018)

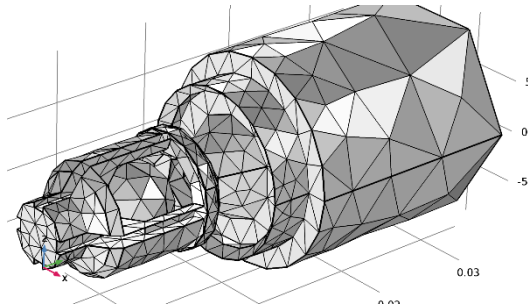


Ilustración 11 – Malla extremadamente gruesa (Fuente: propia)

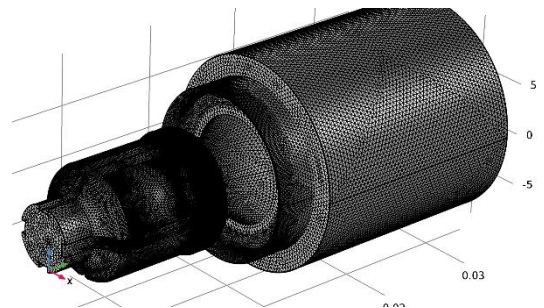


Ilustración 12 – Malla extremadamente fina (Fuente: propia)

9. Estudio de convergencia

El primer paso para llevar a cabo cualquier tipo de estudio por elementos finitos es hacer un estudio de convergencia. El objetivo de dicho estudio es buscar la mejor relación entre tiempo invertido en el cálculo y precisión de los resultados. Dada la geometría y los parámetros del cálculo detallados en el punto anterior se ha hecho el estudio con todos los tamaños de malla.

El estudio se llevó a cabo haciendo el cálculo en función de la velocidad del flujo ($U0$). Dicho parámetro se hizo variar dentro de un pequeño rango. El uso de la velocidad como parámetro característico viene dado por la facilidad de control del régimen laminar, mediante el valor de Reynolds. Controlando dicho valor se asegura no exceder el límite entre régimen laminar y turbulento que recomienda el programa y así conseguir una convergencia mayor y unos valores de salida más precisos.

Estos cálculos se pueden configurar en el programa mediante una herramienta de gran utilidad incluida en la sección de cálculo llamada Parametric Sweep. (COMSOL Multiphysics 2012) Dicha herramienta permite combinar varios parámetros en todos sus rangos y así conseguir los resultados de todas las combinaciones impuestas. Esto genera un ahorro considerable de tiempo en el proceso de cálculo. Dicho procedimiento va en pro de la optimización máxima de los tiempos de cálculo y, por lo tanto, del trabajo.

Barrido paramétrico
 = Calcular ↻ Actualizar solución

Etiqueta: Parametric Sweep

▼ Configuración del estudio

Tipo de barrido: Todas las combinaciones ▼

Nombre de parámetro	Lista de valores de parámetros	Unidad de los parámetros
Y_POS_BOLA ▼	range(0,4.0e-4,0.0020)	
U0 (Initial velocity) ▼	0.01,0.05,0.1	

Ilustración 13 – Configuración Parametric Sweep (Fuente: propia)

9.1. Ejemplo de cálculo de convergencia

Para mostrar dicho ejemplo se tomará el caso de la válvula a velocidad variable entre 0,01 m/s y 0,1m/s con un valor intermedio de 0,05 m/s. Los tiempos de cálculo fueron los siguientes:

Tamaño de malla	Tiempo de cálculo (h:m:s)
Extremadamente Gruesa	0:06:24
Extra gruesa	0:08:54
Más gruesa	0:09:20
Gruesa	0:10:15
Normal	0:12:09
Fina	0:14:09
Más Fina	0:31:20
Extra Fina	1:33:44
Extremadamente Fina	4:54:33

Tabla 4 – Tiempos de cálculo según tamaño de malla (Fuente: propia)

Como se puede observar, a menor tamaño de malla, mayor tiempo de cálculo. A su vez, a mayor tiempo de cálculo significa mayor precisión en los valores de salida del mismo. Se tomará, en todos los casos de convergencia, el valor del caudal másico a la entrada para corroborar la tendencia a la convergencia. Tomando como ejemplo la posición Y_POS_BOLA 0 obtenemos los valores siguientes:

		Extremadamente Gruesa	Extra gruesa	Más Gruesa	Gruesa
Y_POS_BOLA	U0	Magnitud de velocidad (m ³ /s)			
0	0,01	3,10173E-06	3,09649E-06	3,09186E-06	3,10227E-06
	0,05	1,56966E-05	1,56804E-05	1,56349E-05	1,56851E-05
	0,1	3,15878E-05	3,15765E-05	3,14715E-05	3,15726E-05

Normal	Fina	Más Fina	Extra Fina	Extremadamente Fina	
Magnitud de velocidad (m ³ /s)					Y_POS_BOLA
3,12523E-06	3,13320E-06	3,13701E-06	3,14135E-06	3,14425E-06	0
1,57550E-05	1,57995E-05	1,57621E-05	1,57212E-05	1,57264E-05	
3,16816E-05	3,17908E-05	3,16738E-05	3,14711E-05	3,14587E-05	

Ilustración 14 – Resultados de caudal volumétrico Y_POS_BOLA = 0, 3 velocidades y 9 tamaños de malla (Fuente: propia)

Y los resultados gráficos que obtenemos son:

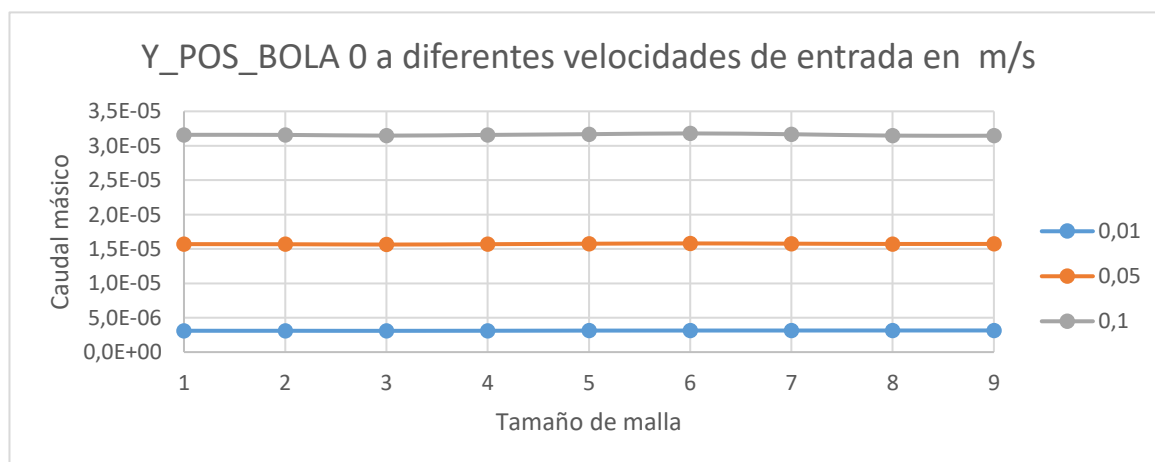


Gráfico 1 - Convergencia de caudal másico para Y_POS_BOLA = 0 a diferentes velocidades (Fuente: propia)

Siendo 1 el tamaño de malla extremadamente grueso y 9 el extremadamente fino, se observa como el valor del caudal volumétrico fluctúa alrededor de $3,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ para $0,01 \text{ m/s}$, $1,57 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ para $0,05 \text{ m/s}$ y $3,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ para $0,1 \text{ m/s}$. Consideraremos éstos valores como los valores de referencia para el siguiente estudio siempre y cuando se utilicen las mismas características de velocidad. Los valores de velocidad se han escogido en función del Reynolds máximo en flujo laminar. Éste es de 2300. Para $0,01 \text{ m/s}$ el Reynolds equivale a 200 y para $0,1 \text{ m/s}$ equivale a 2000, valor suficientemente próximo al límite.

9.2. Resultados del estudio de convergencia

Como se puede observar, los valores comprendidos entre la malla extremadamente gruesa y la extremadamente fina fluctúan alrededor de $3,13 \text{E-}06 \text{ m}^3/\text{s}$. De los resultados obtenidos se puede extraer también que los modelos matemáticos para éste estudio son bastante precisos ya que la variación entre los diferentes valores es baja, del 1,7% aproximadamente. Se ha utilizado para el cálculo el valor del caudal volumétrico dada su invariabilidad a lo largo de toda la válvula. Para no caer en posibles errores por falta de precisión en el futuro y haciendo un balance entre la precisión de los resultados y los tiempos de cálculo, se decidió llevar a cabo el estudio de aquí en adelante con tamaño de malla Normal, 5 en el gráfico. El tiempo medio estimado de cálculo será de aproximadamente 12 minutos por cálculo, variando en función de valores externos al programa. El número total de simulaciones llevadas a cabo para obtener éstos resultados ha sido de 9.

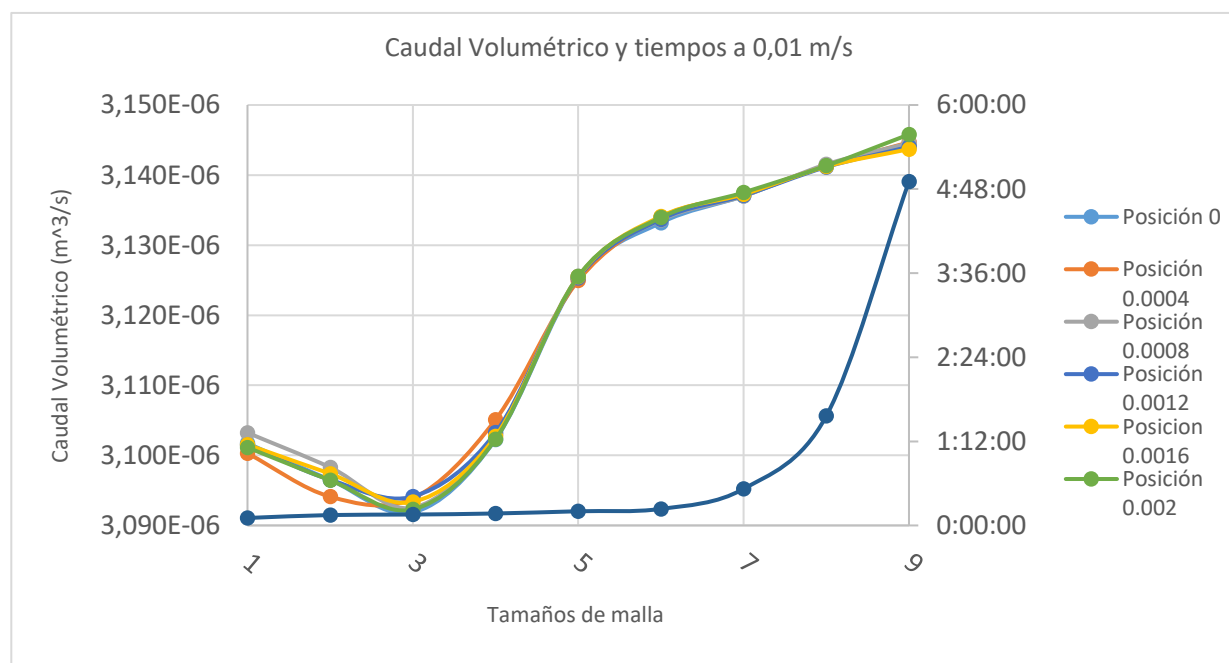


Gráfico 2 – Convergencia de caudal volumétrico según posición y tiempo de cálculo (Fuente: propia)

(Ver resto de tablas en Anexo B)

10. Cálculo por presión

El tiempo de cálculo de los diferentes valores ha fluctuado entre los 9 y los 14 minutos dependiendo de factores externos como la carga de trabajo del pc en el momento del cálculo y del procesador que se estuviera usando. Con el objetivo de ahorrar tiempo en el cómputo global del trabajo se ha decidido suprimir el estudio de la posición $Y_POS_BOLA = 0,002$ m ya que dicha posición equivale a la de válvula completamente cerrada y no era de interés en éste estudio. En la sección de cálculo de convergencia, sí se llevó a cabo el cálculo de dicha posición por razones de optimización en siguientes pasos. El cálculo fue llevado a cabo según presiones, y no según velocidades, dada la facilidad de caracterización de la válvula a posteriori.

10.1. Configuración

El cálculo llevado a cabo comprende las presiones desde 3000 Pa a 4250 Pa. El propósito de este rango es abarcar una amplia selección de valores de Reynolds a la entrada. La presión impuesta a la salida de la válvula será de 0 Pa. El resto de valores de configuración pueden ser consultados en el apartado *Condiciones de contorno e iniciales del estudio*. (Ver apartado 8.1.)

10.2. Resultados

A continuación se presentará una serie de resultados compactados en forma de gráfica dada la extensión de los mismos. El flujo entra en la válvula a una presión P fijada en los parámetros. Al entrar en la sección de la junta tórica se encuentra con un estrechamiento de la sección y con una bola obstaculizándole el paso. El recorrido del fluido bordea la bola no sin dificultades. El sistema intentará hacer frente al estrechamiento, los obstáculos geométricos y al parámetro de presión impuesto. Con el objetivo de corroborar la constancia de la presión de entrada se presenta la tabla siguiente.

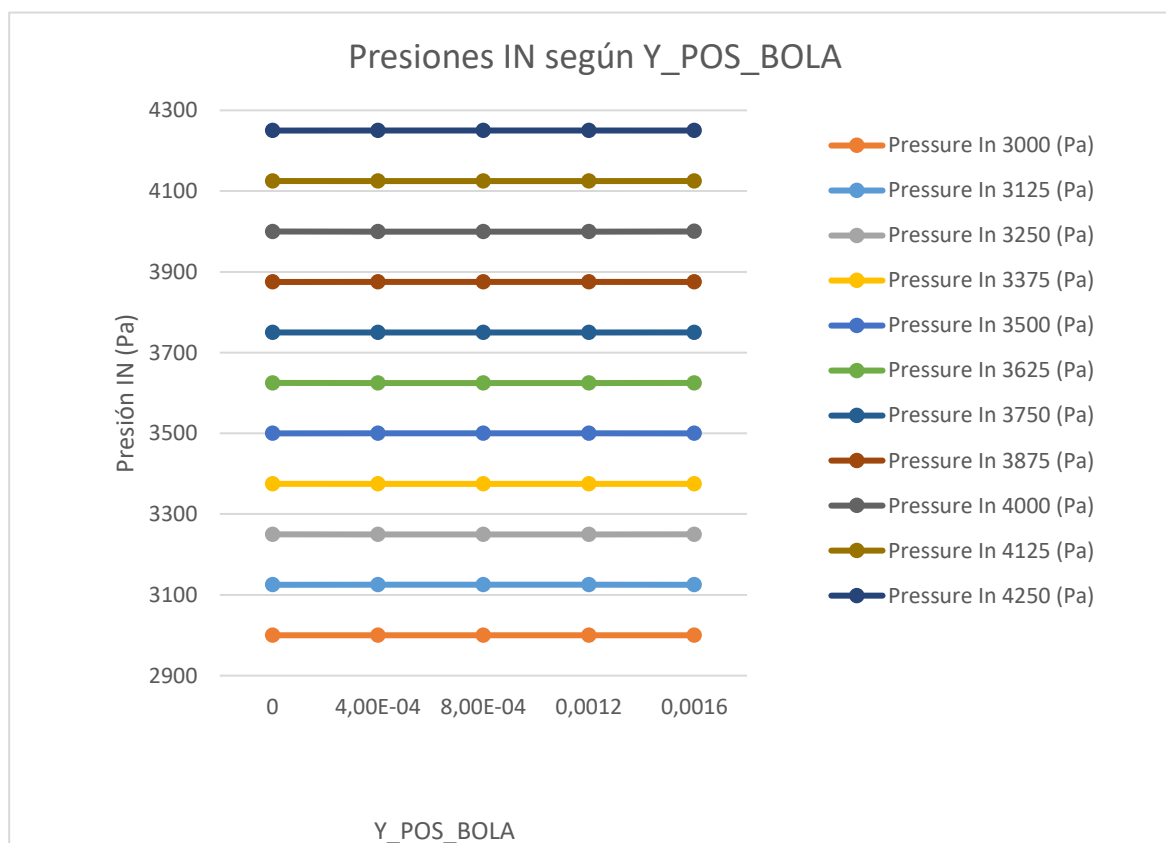


Gráfico 3 – Presiones IN según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)

Una vez superada la bola, el flujo continúa su recorrido hasta la salida de la válvula. Es aquí donde podemos apreciar como la presión a la salida va disminuyendo según la Y_POS_BOLA tiende a 0 m. Esto se debe a que el estrechamiento de la sección de paso comporta una disminución del caudal volumétrico y por ende de la velocidad a la salida.

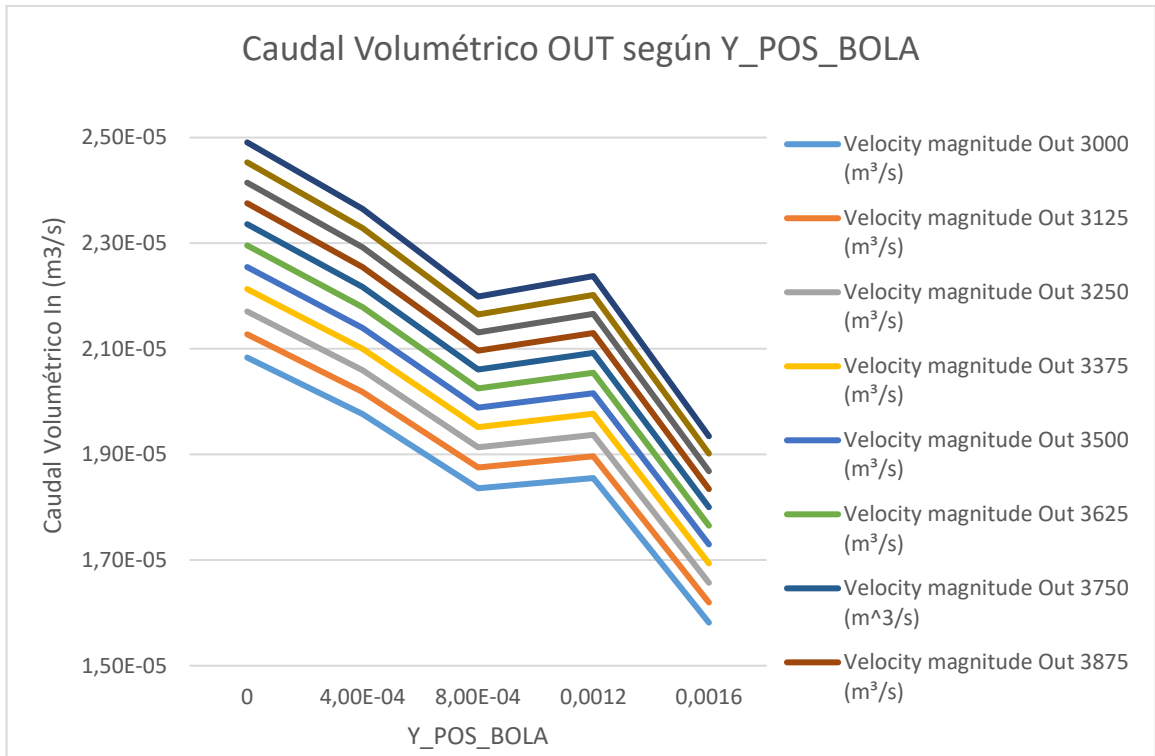


Gráfico 4 – Caudal Volumétrico OUT según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)

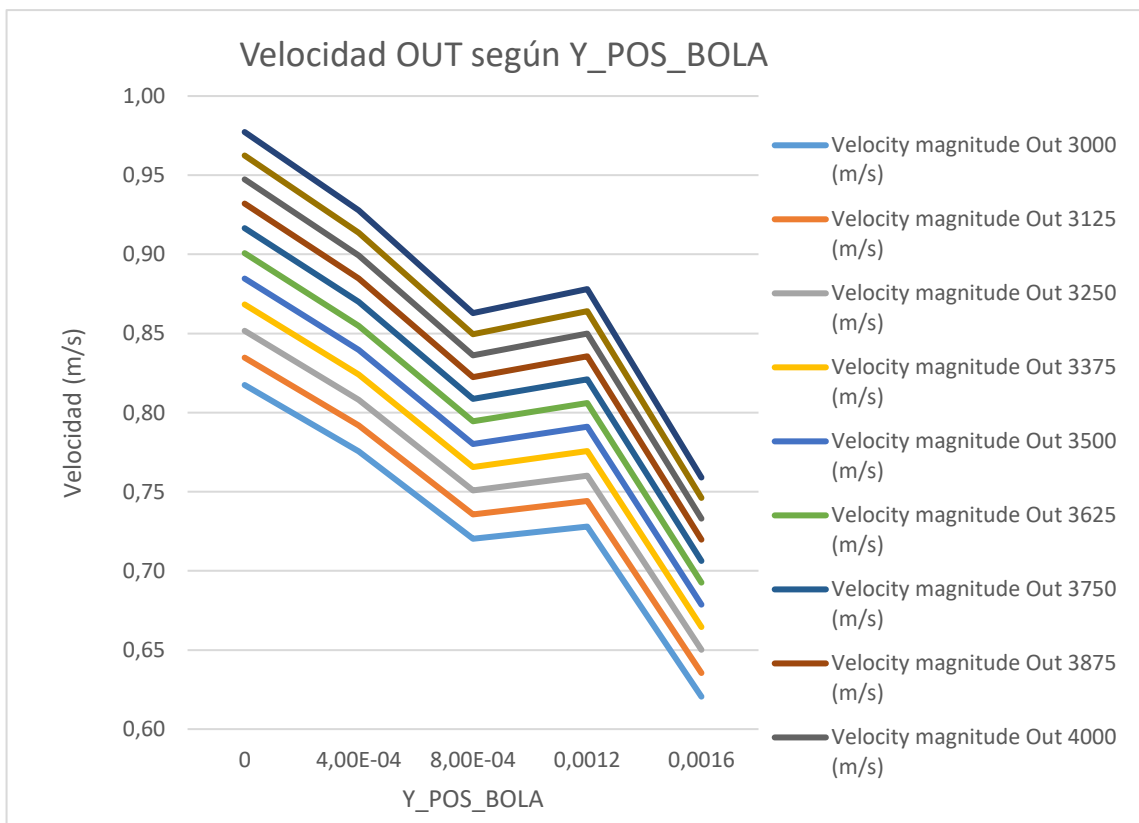


Gráfico 5 – Velocidad OUT según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)

Como se puede observar, a mayor estrechamiento de la sección de paso, mayor es la presión que tiene el flujo en la sección de estrechamiento. La diferencia de presión entre entrada y salida es superior cuando la posición de la bola tiende hacia 0,0016 m.

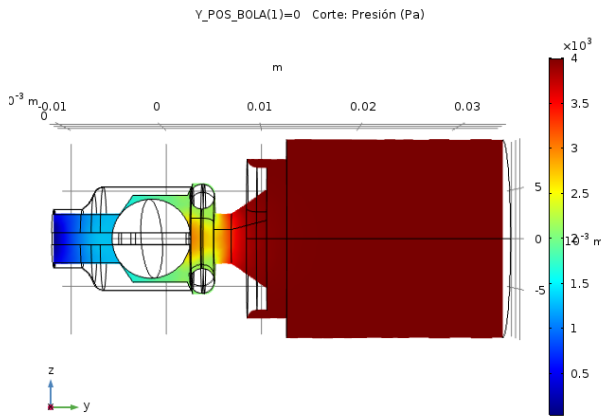


Ilustración 16 – Presión YZ según $P = 4000 \text{ Pa}$ e

$Y_POS_BOLA = 0$ (Fuente: propia)

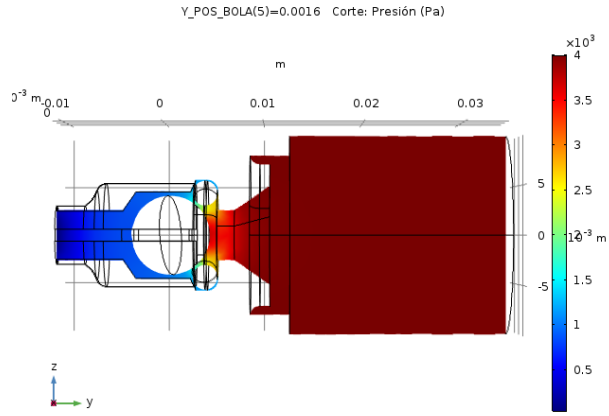


Ilustración 15 – Presión YZ según $P = 4000 \text{ Pa}$ e

$Y_POS_BOLA = 0,0016$ (Fuente: propia)

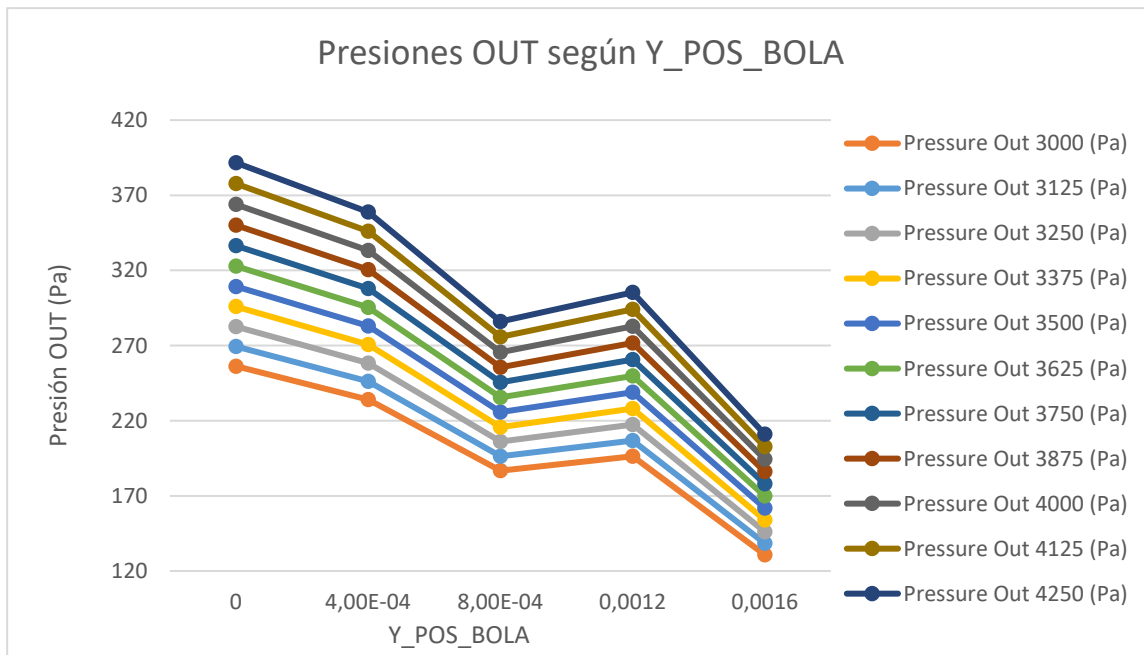


Gráfico 6 – Presiones OUT según Y_POS_BOLA y presión IN (Fuente: propia)

La presión a la salida es considerablemente inferior a la presión de entrada. Se observa como la mínima presión de salida se encuentra en la posición 0,016m en todos los casos. Esto se debe a que en ésta posición la bola obstaculiza lo máximo posible la superficie de salida del flujo, su velocidad aumenta y su presión disminuye.

Una vez superado el obstáculo de la bola, el fluido no tiene mayor dificultad que llegar a la salida de la válvula.

Una vez vistos los valores a la entrada y la salida de la válvula procedemos a hacer un estudio de la pérdida de carga para valorar en cada caso el coeficiente de pérdidas K. Todas las geometrías atravesadas por un flujo afectan a éste mediante un coeficiente de pérdidas. En éste caso y según los datos recogidos se procedió a empaquetar el factor k en tres rangos diferenciados. Los rangos vienen dados por la Y_POS_BOLA. El primer rango equivale al valor 0,0016 m y se sitúa alrededor del valor $1,11\text{E}+13$. El segundo rango contiene los valores de posición 0,0012 m y $8\text{E}-4$ m. En éstos el valor de k se aproxima a $7,8\text{E}+12$. Por último, el paquete que agrupa a los valores 0m y $4\text{E}-4$ m se aproxima al coeficiente valorado en $6,43\text{E}+12$.

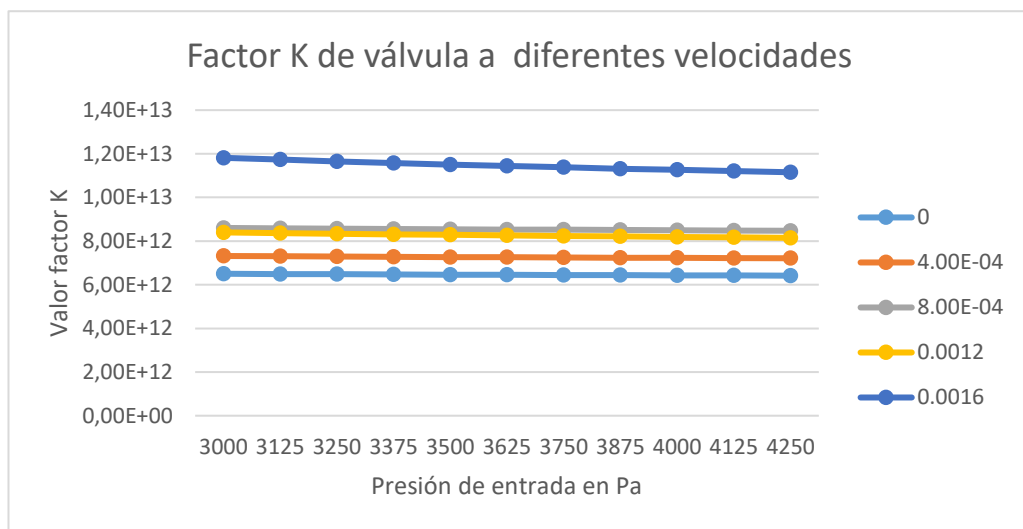


Gráfico 7 – Factor K según presiones e Y_POS_BOLA (Fuente: propia)

Obtenidos ya los valores de presión, velocidad y caudal se ha procedido a estudiar los valores de Reynolds entre la entrada y la salida. Se recuerda que según COMSOL la frontera entre flujo laminar y flujo turbulento está en 2300.

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3000	Reynolds Out 3000
0	1320.448056	4087.14625
4.00E-04	1249.919339	3877.258616
8.00E-04	1162.509702	3601.195805
0.0012	1174.631497	3639.951403
0.0016	1001.815896	3102.618776

Tabla 5 – Reynolds IN – OUT P = 3000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 4250	Reynolds Out 4250
0	1576.51651	4886.373686
4.00E-04	1493.072352	4639.096643
8.00E-04	1390.467407	4313.891171
0.0012	1414.44102	4389.776624
0.0016	1223.320457	3794.878564

Tabla 6 – Reynolds IN – OUT $P = 4250$ Pa (Fuente: propia)

La diferencia entre los valores de las dos tablas es notable. Cabe remarcar que siendo ambas simulaciones laminares en el flujo de entrada, se vuelven turbulentas a la salida. Esto es producto del aumento de velocidad como de la diferencia de sección entre entrada y salida. Las tablas mostradas incorporan los valores extremos del estudio total. El resto de valores añaden la información faltante para las presiones calculadas entre ambas. (Ver anexo B)

Con todos los datos abordados y el resto añadidos en los anexos se considera caracterizada la válvula para regímenes laminares y poco turbulentos en flujos a presiones entre 3000 Pa y 4250 Pa.

11. Sincronización COMSOL-SOLIDWORKS

Uno de los objetivos de éste trabajo era lograr parametrizar la geometría de la válvula de una manera más acertada. Para ello se ha aprovechado el módulo LiveLink® for SolidWorks que COMSOL incorpora. Mediante la sincronización del archivo .mph de COMSOL con el archivo de ensamblaje .sldasm de SolidWorks se logra enlazar los parámetros seleccionados en el CAD e importarlos al programa de cálculo. El módulo se encarga de agregar una pestaña de opciones en SolidWorks. Para que la conexión primera se haga efectiva es necesario que ambos programas estén abiertos, que en SolidWorks se tenga abierta la geometría y que se hayan seleccionado los parámetros deseados para su trasvase a COMSOL.

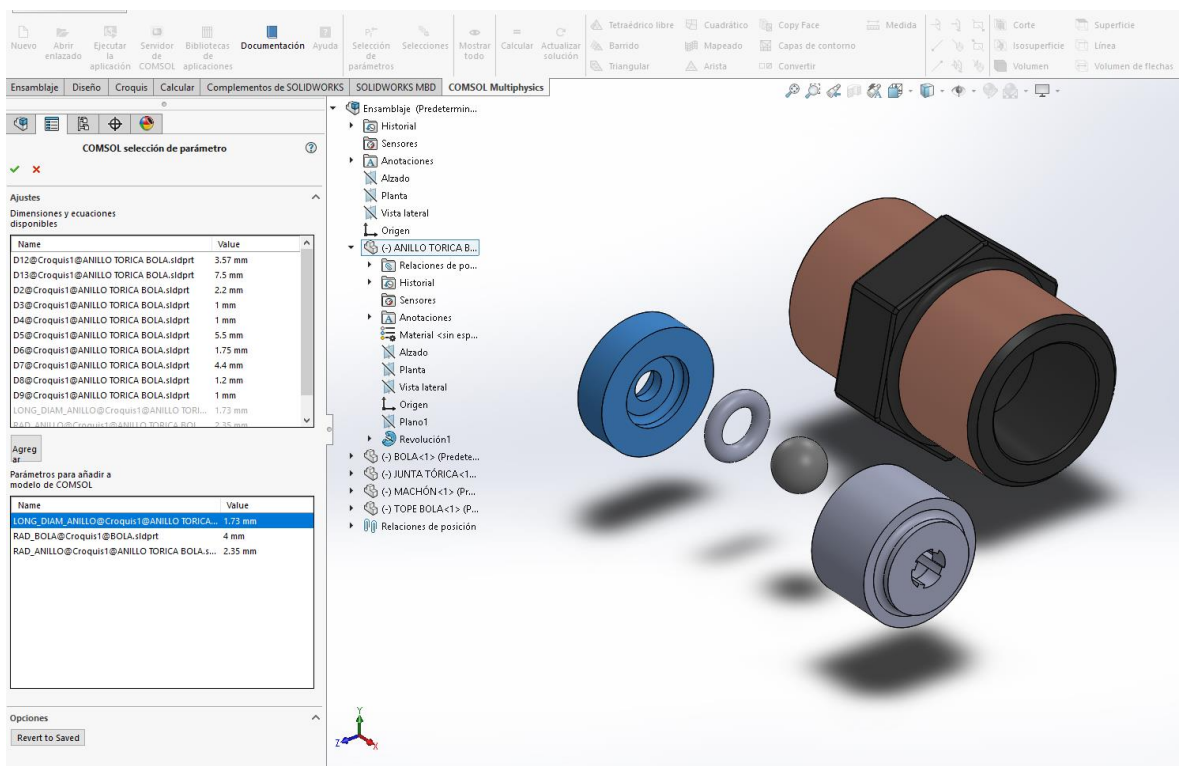


Ilustración 17 – Selección de parámetros de válvula en SolidWorks (Fuente: propia)

El triaje de estos parámetros fue comedido ya que la capacidad de importar parámetros es total. Se tuvo que tener en cuenta qué parámetros geométricos se quería hacer variar sin desvirtuar en exceso la forma inicial de la válvula. Finalmente se seleccionaron 3 parámetros relevantes, éstos son:

- LONG_DIAM_ANILLO: Evalúa la longitud de cilindro que direcciona el flujo hacia la junta tórica inmediatamente después de la reducción de sección en el paso del flujo. Su valor básico es de 1,729 mm.

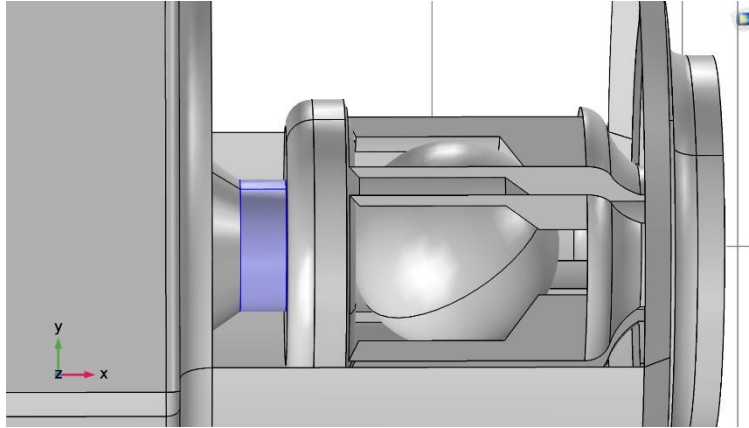


Ilustración 18 – Geometría LONG_DIAM_ANILLO (Fuente: propia)

- RAD_BOLA: Éste parámetro controla el diámetro de la bola. Su valor básico es de 4 mm y siempre ha de ser menor o igual a éste valor ya que sino se incurriría en la intersección de las geometrías.

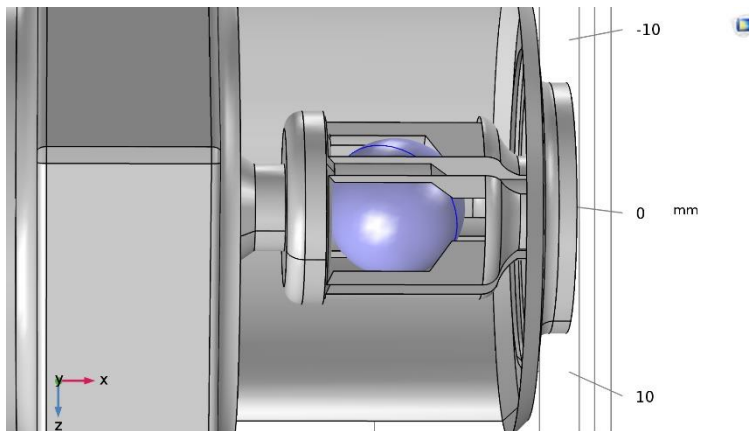
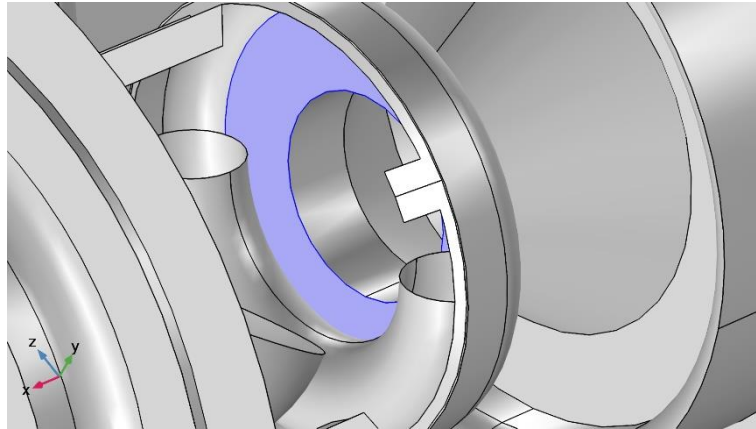


Ilustración 19 – Geometría RAD_BOLA (Fuente: propia)

- RAD_ANILLO: Parámetro que varía la sección de entrada de flujo en el área de la junta tórica. Es junto a RAD_BOLA el parámetro geométrico cuya variación tiene más relevancia en los resultados. Su valor básico es de 2,35 mm.



Il·lustració 20 – RAD_ANILLO (Fuente: propia)

12. Aplicación para estudio

Una vez concluido con éxito el enlace entre COMSOL y SolidWorks se ha llevado a cabo una aplicación de aprendizaje enfocada a los alumnos de la universidad. Gracias al módulo App Builder que COMSOL incorpora se pueden generar simulaciones en las cuales los valores posibles de pre-proceso, cálculo y post-proceso son limitados por el creador.

La edición de este programa se divide en ventana principal, formularios, declaraciones y métodos. El módulo utiliza en toda la programación el lenguaje Java. No fue necesario el uso directo ni el conocimiento previo del lenguaje para la realización de la aplicación. Aun así, conocerlo comportaría una ayuda a la hora de comprender rápidamente como relacionar todos los tipos de objetos que se pueden incorporar al sistema. (COMSOL Multiphysics 2018)

El uso de éstas aplicaciones es muy interesante ya que el coste de las infraestructuras de cálculo de las mismas es nulo. A su vez se reduce la dificultad de las simulaciones al mínimo. Éstos aspectos son harto interesantes para los potenciales clientes de cálculo.

12.1. Ventana principal

Se incorporan en ésta sección la pestaña desplegable de archivo y la franja principal con acceso a los botones más relevantes de los cuatro procesos fundamentales. En el desplegable encontramos botones de Guardar y Guardar Como. En la franja encontramos accesos a Geometría, Malla, Cálculo, Resultados y Ayuda. En concreto en la sección de ayuda se accede a un archivo PDF con la guía de uso de la aplicación y algunas aclaraciones sobre el mismo. (*Ver anexo D*) La configuración de cada botón es muy simple e intuitiva. Esta característica se repite a lo largo de todo el app builder. El propósito de esto es hacer de COMSOL una aplicación de fácil acceso y de rápida distribución para el conocimiento del mayor público posible. (COMSOL Mutiphysics 2012)

Para configurar cada botón hay que dar acceso al app builder a los datos necesarios. Esto se hace mediante el botón *Acceso a datos*. Una vez el comando a ejecutar es accesible se señala su ruta en los ajustes del ítem que estamos configurando y el botón queda listo para su uso. Existen configuraciones extra como el tipo de icono a incorporar, el texto, el tamaño o la posición del mismo en la franja.

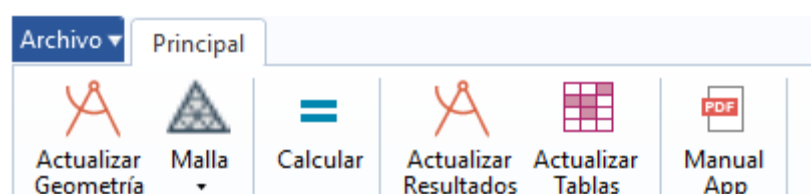


Ilustración 21 – Franja principal de la aplicación (Fuente: propia)

12.2. Declaraciones

El nodo de declaraciones en el árbol de aplicación se usa para declarar variables las cuales son usadas en conjunto con los parámetros y variables ya definidas en el modelo. Las variables definidas bajo el nodo de declaraciones son usadas en forma de objetos y métodos. Aquí se alojará la única declaración de todo el modelo. Hace referencia al método de importación del archivo CAD para su posterior tratado en la fase de edición de parámetros geométricos.

12.3. Métodos

El conjunto de pasos necesarios para llevar a cabo una acción no automatizada previamente por el programa se denomina método. Para facilitar su inclusión en las aplicaciones existe un asistente que graba todos los pasos hechos por el creador en la ventana de construcción de modelo y los extrae en código Java en un método con un nombre concreto. Así se puede asociar una acción grabada en un método que requeriría un volumen alto de clics a un solo clic de ratón mediante su enlace. Los métodos agilizan mucho los procesos de cálculo. (COMSOL Multiphysics 2015)

12.4. Formularios

Dentro del menú de formulario se encuentran todos los objetos deseables de enseñar en la pantalla principal del programa. Estos objetos son susceptibles de ser interaccionados por el usuario. La pantalla principal se dividió en 3 secciones.

12.4.1. Sincronización

Se incorporó una pestaña de texto, una declaración referente a la importación del archivo CAD y un método enlazado a botón de sincronización.

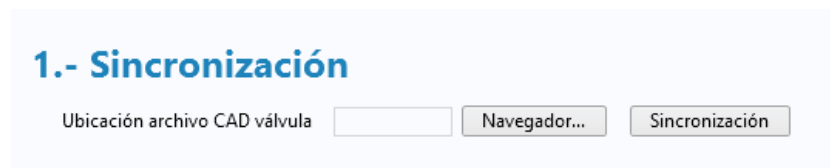


Ilustración 22 – Sección de sincronización (Fuente: propia)

12.4.2. Parámetros

En esta sección se incorporan los parámetros geométricos conectados desde SolidWorks más los propios generados en el constructor de modelos de COMSOL. Se incorpora el FACTOR_RAD_BOLA, valor multiplicador del RAD_BOLA. Al cambiar su valor se observa el nuevo radio de la bola. Se pueden variar igualmente tanto la presión de entrada como la velocidad de entrada. A título informativo aparecen unas aproximaciones al tiempo de cálculo de los diferentes tamaños de malla. Existen

2.- Parámetros

▼ Parámetros

RAD_ANILLO (1.72-3.5):	<input type="text" value="2.3499999999999999"/>	mm
LONG_RAD_ANILLO (1.5-3.6):	<input type="text" value="1.7296299831447"/>	mm
FACTOR_RAD_BOLA (0.1-1):	<input type="text" value="1"/>	
RAD_BOLA:	0.004 m	
Presión externa:	<input type="text" value="0"/>	Pa
Presión Entrada (3000 - 4250):	<input type="text" value="3000"/>	Pa
El tiempo estimado de cálculo para la malla Fina es de 10 min		
El tiempo estimado de cálculo para la malla Más Fina es de 40 min		

también en cada valor ingresable un rango de valores permitidos. En caso de saltarse dichos valores

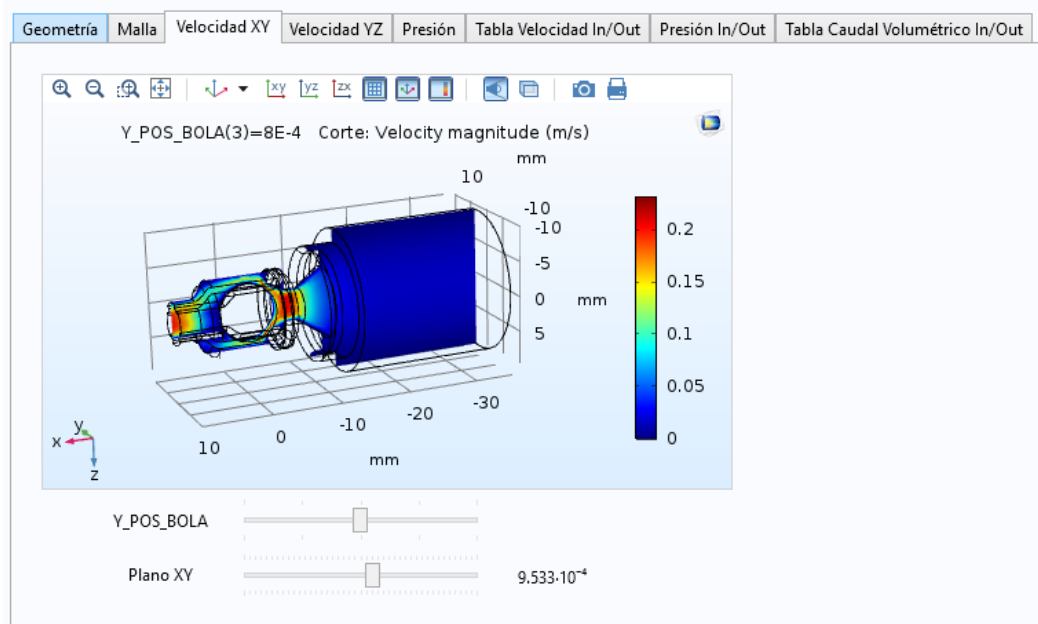
Ilustración 23 – Sección de parámetros (Fuente: propia)

aparecerá un rótulo de advertencia en el momento de empezar el cálculo impidiendo la realización del mismo y pidiendo que se retoque.

12.5. Gráficos

En ésta parte de la aplicación se puede acceder a la geometría, la malla, las gráficas de velocidad y presión y las tablas de velocidad, presión y caudal volumétrico. Todos los datos son exportables tanto en formato fotográfico para las imágenes como en formato Excel o txt para las tablas. Las gráficas son interactivas dejando al usuario explorar las diferentes características de posición de bola y planos de estudio.

3.- Gráficos



Il·lustració 24 – Secció de gràfics (Fuente: propia)

13. Estudio de impacto ambiental

En éste capítulo se analiza el impacto ambiental del proyecto. Para realizar un análisis detallado del consumo eléctrico y de las emisiones de CO₂ generadas.

Para realizar el proyecto se ha usado un ordenador personal y un servidor de la universidad. Para llevar a cabo el cálculo necesitamos saber cuántas horas se han requerido completamente para llevar a cabo todo el estudio. El valor es de 27 horas. Este número equivale a calcular 12 minutos por cálculo y 135 cálculos generados entre erróneos y correctos. El porcentaje de cálculos llevados a cabo en el servidor de la universidad es del 20%, en total 27. El 80% restante se llevaron a cabo en el ordenador personal, siendo un total de 108 cálculos. A éstas horas de cálculo se les debe sumar una media de 3 horas de trabajo al día durante un periodo de aproximadamente 60 días laborables. Esto hace un total de 180h más de uso del ordenador personal.

Para obtener el consumo y las emisiones de cada uno de ellos se han usado las siguientes ecuaciones:

$$\text{Consumo Total [kWh]} = \text{Horas de Trabajo [h]} \cdot \text{Consumo [kW]}$$

Ecuación 3 – Consumo total de energía (Fuente: propia)

Sabiendo que el ordenador personal tiene un consumo de 0,1 kW y el servidor 0,14 kW podemos evaluar la ecuación anterior. Sabiendo el consumo total de cada procesador podemos aplicar también la fórmula de emisiones de CO₂.

$$\text{Emisiones [kg CO}_2\text{]} = \text{Factor de Emisiones [kg CO}_2\text{/kWh]} \cdot \text{Consumo Total [kWh]}$$

Ecuación 4 – Emisiones totales de CO₂ en kilogramos (Fuente: propia)

	Hora de trabajo [h]	Consumo [kWh]	Factor de emisiones [kg CO ₂ /kWh]	Emisiones totales [kg CO ₂]
Ordenador personal	201.6	20.16	0.385	7.7616
Servidor universitario	5.4	0.756	0.385	0.29106
Total	207	20.916	-	8.05266

Tabla 7 – Agrupación de datos sobre consumo energético y emisiones totales (Fuente: propia)

El consumo total es de 20,916 kWh y las emisiones de CO₂ totales son de 8,052 kg. Éste consumo es más que razonable dado que la exigencia de potencia de cálculo no era excesiva. En los casos de cálculo con tamaños de malla inferiores este consumo subirá exponencialmente. El monto mayor de gasto energético es debido al número de horas dedicado al autoaprendizaje, post-proceso de datos y redacción del trabajo.

Conclusiones

Tras la lectura de las soluciones podemos evaluar satisfactoriamente todo el proceso llevado a cabo. El estudio de convergencia ha supuesto un acierto visto los valores precisos de los resultados y el bajo consumo energético y temporal durante el proceso. Es un paso previo imprescindible de todo cálculo por elementos finitos y así ha quedado demostrado.

El cálculo por valores por presión ha sido correcto gracias a un estudio abarcando un rango suficientemente amplio. La cantidad de parámetros seleccionados ha sido acertada. Pese a la cantidad de datos recogidos y post-procesados, estos se han podido exponer de manera clara mostrando la correcta parametrización de la válvula. El objetivo de poder ofrecer un valor bastante aproximado del coeficiente de pérdidas hace pensar que se ha tratado bien los datos de salida de las simulaciones. Ha quedado plasmado también que con un trabajo más extenso y quizás con unos tamaños de malla más pequeños se podría haber obtenido un valor singular para todos los casos de posición de bola. Éste aspecto queda pendiente para un posible futuro trabajo de refinado de los cálculos expuestos en éste trabajo.

El objetivo inicial de llevar a cabo el estudio en diferentes regímenes no se ha podido cumplir puesto que sólo se ha calculado parámetros en régimen laminar. Dicho estudio podría ser de interés en un futuro trabajo. Sin embargo se ha podido comprobar cómo partiendo de un estado de régimen laminar se concluía el paso del flujo a través de la válvula en régimen laminar en algunos casos y turbulento en otros.

Se ha podido observar con precisión como la válvula reacciona al establecimiento de una presión indicada. El seccionamiento del área de paso aumentaba la presión en la zona de movimiento de la bola, disminuía su caudal volumétrico y su velocidad se veía incrementada. La velocidad también se ha visto incrementada en la sección previa al encuentro del flujo con la junta tórica. En un paso siguiente se podría estudiar el efecto de dichas presiones y caudales en la estructura de la válvula. Conocido el material del que están hechas las diferentes piezas se podría crear un estudio multifísico acoplando el módulo de Fluid Flow con el de Structural Mechanics para comprobar los efectos anteriormente descritos.

Por último, la generación de la aplicación se valora positivamente. El objetivo de proporcionar de una herramienta didáctica de aprendizaje de elementos finitos en mecánica de fluidos se ha cumplido. La herramienta es susceptible de cambios y adaptaciones, según el profesorado de la universidad y la asignatura que impartan lo requieran. La aplicación es moldeable y en su edición se goza de un entorno de trabajo amigable. Por otra parte, el aprovechamiento de dicha aplicación como herramienta de cálculo de las diferentes válvulas o de cualquier otro sistema susceptible de ser modelizado por

elementos finitos de cara a potenciales clientes aumenta el interés por la aplicación. El precio de creación de la misma es casi nulo y las posibilidades de las mismas, muy extensas.

Por último, quiero destacar el cumplimiento del objetivo de aprendizaje autónomo que ha supuesto el conocimiento del conjunto de programas utilizados a lo largo de todo el estudio. Éste conocimiento no será desaprovechado en el futuro

Presupuesto económico

En este capítulo se analiza el presupuesto y el impacto económico del proyecto. Se tendrá en cuenta el análisis del impacto ambiental realizado en el capítulo 13 ya que los datos del consumo se traducirán en el presupuesto del coste de realizar el proyecto.

La tarifa eléctrica seleccionada para el análisis del gasto energético es la equivalente a una potencia contratada de 10-15 kW. El precio medio de dicha tarifa está en 0,125 €/kWh.

	Consumo total [kWh]	Precio tarifa eléctrica [€/kWh]	Costes totales [€]
Ordenador personal	20.16	0.125	2.52
Servidor universitario	0.756	0.125	0.0945
Total	20.916	-	2.6145

Tabla 8 – Costes energéticos totales (Fuente: propia)

Como se puede observar, el consumo total de energía eléctrica es de 2,61 €.

La mano de obra es la siguiente parte a evaluación en el trabajo de la sección económica. El convenio por el que se rige este tipo de trabajo es el Convenio Colectivo de Oficinas Técnica e Ingeniería. Dicho trabajo corresponde a la categoría de un 'Técnico de cálculo' el cual tiene una retribución salarial de 1208,4 € al mes. Añadido el 28 € de retención para la Seguridad Social el sueldo total a pagar por la empresa es de 1546,75€. El trabajo ha requerido un total de tres meses, esto suma una retribución total de 4640,25€.

Por último se ha de tener en cuenta el coste de las licencias. Tanto COMSOL como SolidWorks son software de tipo comercial y sus licencias requieren un pago previo uso. Visto que COMSOL se ha usado tanto en el ordenador personal como en el servidor, se duplicará su precio. Por su lado SolidWorks sólo ha sido usado en el ordenador personal.

	Precio unidad [€]	Precio total [€]
COMSOL Multiphysics	1491.6	2983.2
CFD Module	1491.6	2983.2
Material Library	435.6	871.2
LiveLink for SOLIDWORKS	875.6	1751.2
CAD Import Module	699.6	1399.2
SOLIDWORKS standard	6600	6600
SW annual suscription	1500	1500
Total licencias	-	18088

Tabla 9 – Precios de licencias (Fuente: propia)

El precio total de las licencias asciende a 18088 €.

	Coste[€]
Consumo eléctrico	2.61
Mano de obra	4640.25
Precio licencias	18088
Total	22730.86

Tabla 10 – Coste total del proyecto (Fuente: propia)

El precio total del proyecto ha sido de 22730,86 €.

Bibliografia

Addlink. «Youtube - Desarrollo de apps a partir de modelos de COMSOL Multiphysics.» 23 de 11 de 2016.

https://www.youtube.com/watch?v=ToRh34PD1vc&list=PLzME_DW6HRWvNH3PwViru01s_F7oWZbAq&index=11&t=1s (último acceso: 1 de 2019).

Capua, Daniel Di. «Aplicaciones de Mecánica Computacional.» *ERM*. Barcelona: UPC, 2007.

COMSOL Multiphysics. «Youtube - How to Create 2D Models from 3D Geometries in COMSOL Multiphysics.» 9 de 3 de 2017.

https://www.youtube.com/watch?v=4YnKDdzYE3I&list=PLzME_DW6HRWvNH3PwViru01s_F7oWZbAq&index=2&t=405s (último acceso: 1 de 2018).

COMSOL Multiphysics. *Forum*. 2015. <https://www.comsol.com/forum> (último acceso: 12 de 2018).

—. *Introduction To COMSOL Multiphysics*. 2012.

<https://cdn.comsol.com/documentation/5.4.0.246/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf> (accessed 12 2, 2018).

—. «Youtube - How to Build a Mesh in COMSOL Multiphysics.» 1 de 2 de 2018.

https://www.youtube.com/watch?v=UK8O-LV1uoU&list=PLzME_DW6HRWvNH3PwViru01s_F7oWZbAq&index=4&t=0s (último acceso: 12 de 2018).

—. «Youtube - How to Create a Simulation App from Your COMSOL Model.» 16 de 8 de 2018.

<https://www.youtube.com/watch?v=CGjJGHu2ghw> (último acceso: 1 de 2019).

—. «Youtube - Solving for laminar flow using Comsol.» 27 de 1 de 2014.

https://www.youtube.com/watch?v=kvUTRyvEuGk&list=PLzME_DW6HRWvNH3PwViru01s_F7oWZbAq&index=6&t=0s (último acceso: 11 de 2018).

COMSOL Mutiphysics. "Introduction To Application Builder." 2012.

<https://cdn.comsol.com/documentation/5.4.0.246/IntroductionToApplicationBuilder.pdf> (accessed 1 2, 2019).

Fontanals, Alfred. «Introducció a la mecànica de fluids - Tema 1.» Barcelona: UPC, 2013.

Torres, R., Grau, J. *Introduccion a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics*. Barcelona: Addlink Media, 2007.

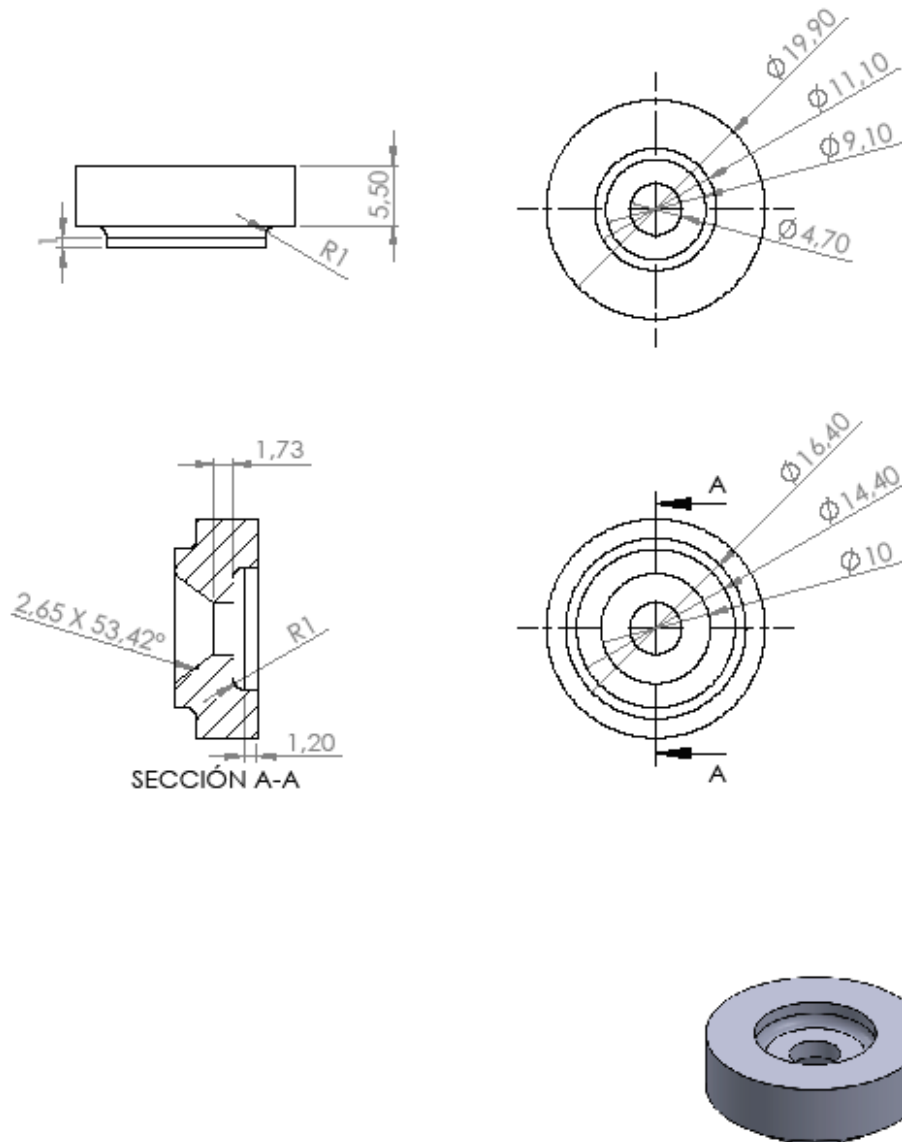
White, Frank M. *Mecánica de fluidos 5ª Ed.* McGraw-Hill, 2003.

Wikipedia. *Mecánica de fluidos computacional.* 2017.
https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos_computacional (último acceso: 1 de 2019).

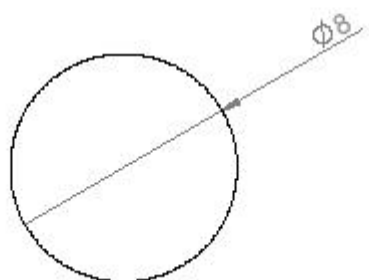
—. *Método de los elementos finitos.* 2010.
https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos (último acceso: 1 de 2019).



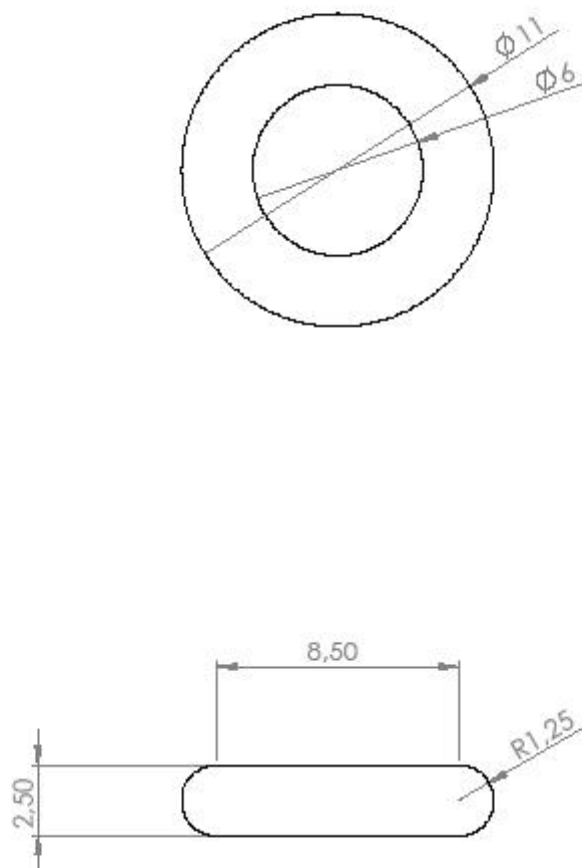
Anexo A – Planos



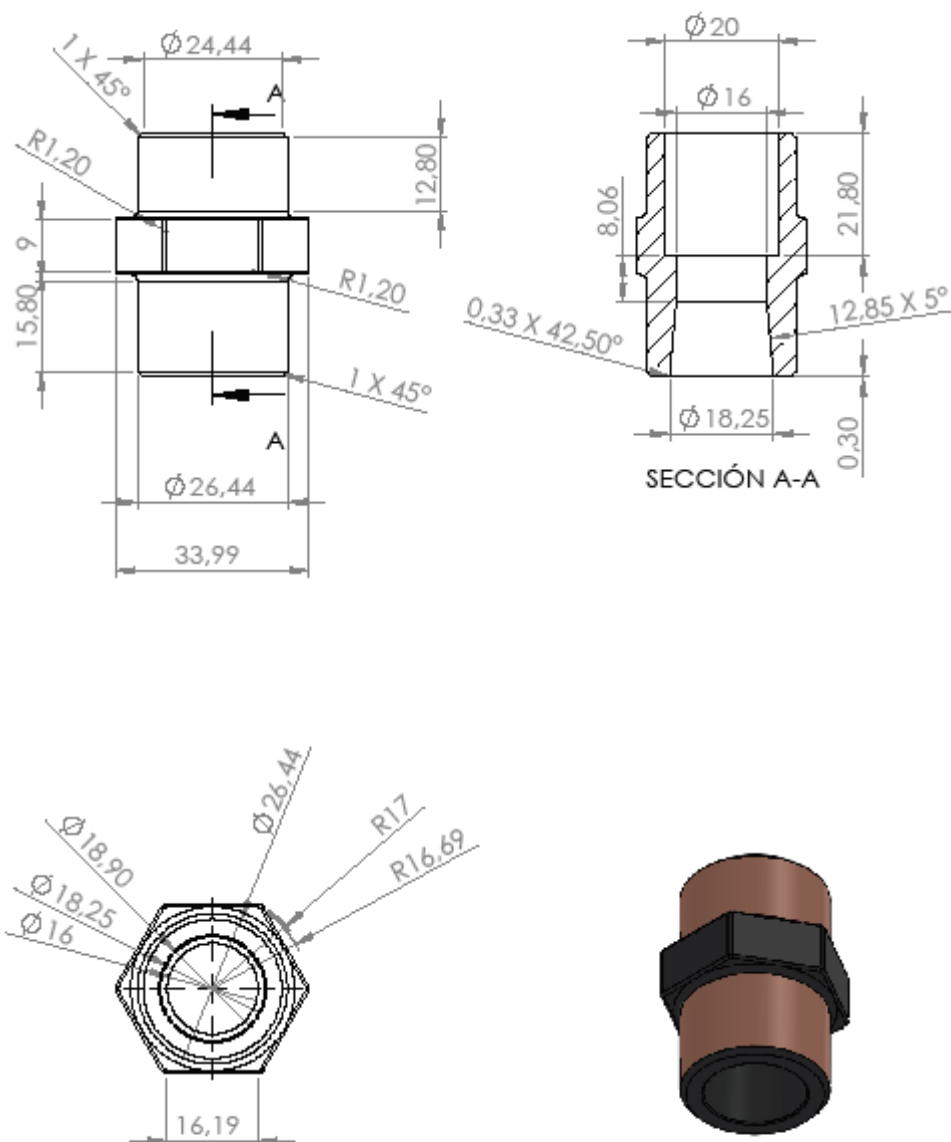
Simulación numérico-computacional de válvulas de bomba dosificadoras alternativas			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		
Lamina	Nº plano	Escala	Comprobado por	Fecha	
Anillo Tónica Bola	1	2:1	Ricardo Torres Camara	7/1/19	
Las medidas serán dadas en mm			Dibujado por	Fecha	
			Tomás Deus Botll	4/1/19	





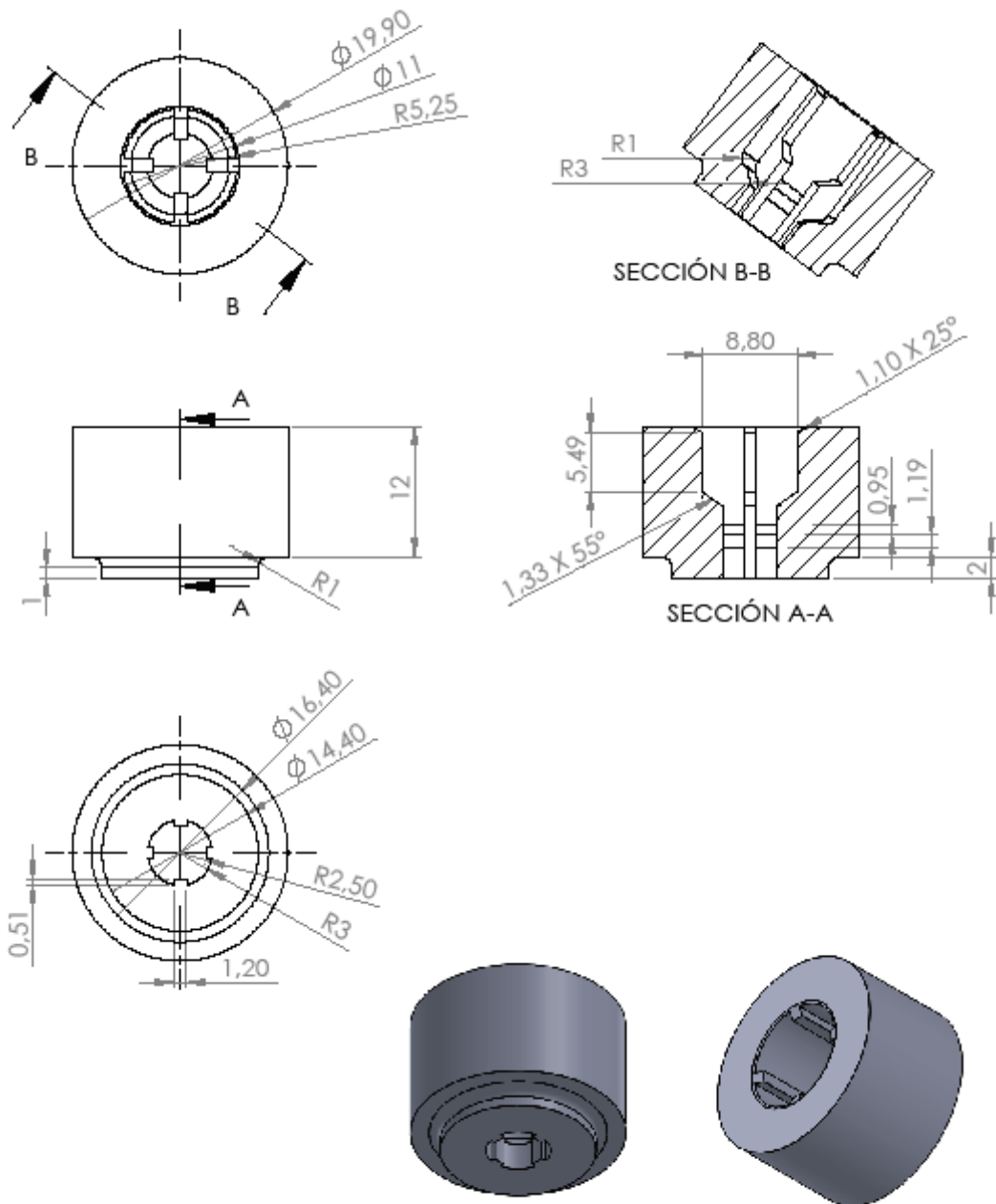
Simulación numérico-computacional de válvulas de bomba dosificadoras alternativas			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		
Lamina	Nº plano	Escala	Comprobado por	Fecha	
Bola	2	2:1	Ricardo Torres Camara	7/1/19	
Las medidas serán dadas en mm			Dibujado por	Fecha	
			Tomás Deus Botti	4/1/19	



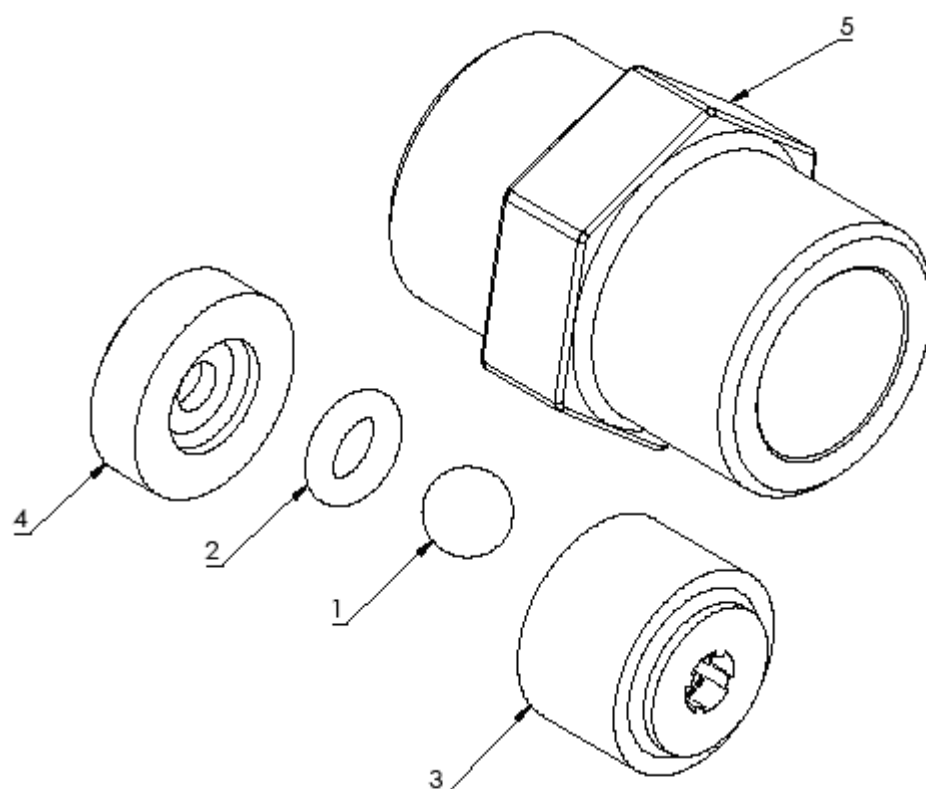
Simulación numérico-computacional de válvulas de bomba dosificadoras alternativas			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		
Letra	Nº plano	Escala	Comprobado por	Fecha	
Junta Tórica	3	2:1	Ricardo Torres Camara	7/1/19	
Las medidas serán dadas en mm			Dibujado por	Fecha	
			Tomás Deus Botti	4/1/19	





Simulación numérico-computacional de válvulas de bomba dosificadoras alternativas			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		
Lamina	Nº plano	Escala	Comprobado por	Fecha	
Machón	4	2:1	Ricardo Torres Camara	7/1/19	
Las medidas serán dadas en mm			Dibujado por	Fecha	
			Tomás Deus Botti	4/1/19	



Simulación numérico-computacional de válvulas de bomba dosificadoras alternativas			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	
Letra	Nº plano	Escala		
Tope Bola	5	2:1	Comprobado por Ricardo Torres Camara Dibuñado por Tomás Deus Botti	Fecha 7/1/19 Fecha 4/1/19
Las medidas serán dadas en mm				



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	BOLA	1
2	JUNTA TÓRICA	1
3	TOPE BOLA	1
4	ANILLO TORICA BOLA	1
5	MACHÓN	1

Simulación numérico-computacional de válvulas de bomba dosificadoras alternativas			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		
Línea	Nº plano	Escala	Comprobado por	Fecha	
Explosionado	6	2:1	Ricardo Torres Camara	7/1/19	
Las medidas serán dadas en mm			Dibujado por	Fecha	
			Tomás Deus Botti	4/1/19	

Anexo B – Cálculo de convergencia

En ésta sección se muestran los valores y gráficas completos resultado del estudio de convergencia. Se aprecia como a pesar de las variaciones en el tamaño de malla, los cambios en los resultados de la convergencia son poco dispares. Es por esto que el tamaño de malla seleccionado para llevar a cargo el trabajo no es excesivamente fino, sino está en un término medio.

		Extremadamente Gruesa	Extra gruesa	Más Gruesa	Gruesa	Normal	Fina	Más Fina	Extra Fina	Extremadamente Fina
Y_POS_BOLA	U0	Magnitud de velocidad (m ³ /s)								
0	0,01	3,10173E-06	3,09649E-06	3,09186E-06	3,10227E-06	3,12523E-06	3,13320E-06	3,13701E-06	3,14135E-06	3,14425E-06
	0,05	1,56966E-05	1,56804E-05	1,56349E-05	1,56851E-05	1,57550E-05	1,57995E-05	1,57621E-05	1,57212E-05	1,57264E-05
	0,1	3,15878E-05	3,15765E-05	3,14715E-05	3,15726E-05	3,16816E-05	3,17908E-05	3,16738E-05	3,14711E-05	3,14587E-05
4,00E-04	0,01	3,10029E-06	3,09411E-06	3,09386E-06	3,10509E-06	3,12495E-06	3,13401E-06	3,13728E-06	3,14137E-06	3,14467E-06
	0,05	1,56948E-05	1,56768E-05	1,56600E-05	1,57174E-05	1,57566E-05	1,58101E-05	1,57672E-05	1,57195E-05	1,57281E-05
	0,1	3,16028E-05	3,15807E-05	3,15307E-05	3,16560E-05	3,16950E-05	3,18212E-05	3,16857E-05	3,14664E-05	3,14609E-05
8,00E-04	0,01	3,10323E-06	3,09829E-06	3,09254E-06	3,10301E-06	3,12553E-06	3,13359E-06	3,13700E-06	3,14153E-06	3,14455E-06
	0,05	1,57214E-05	1,57093E-05	1,56437E-05	1,56874E-05	1,57561E-05	1,58041E-05	1,57668E-05	1,57219E-05	1,57281E-05
	0,1	3,16540E-05	3,16568E-05	3,14876E-05	3,15784E-05	3,16909E-05	3,18030E-05	3,16929E-05	3,14724E-05	3,14606E-05
0,0012	0,01	3,10147E-06	3,09651E-06	3,09413E-06	3,10325E-06	3,12533E-06	3,13370E-06	3,13709E-06	3,14115E-06	3,14403E-06
	0,05	1,57055E-05	1,56958E-05	1,56630E-05	1,56776E-05	1,57598E-05	1,58042E-05	1,57656E-05	1,57202E-05	1,57290E-05
	0,1	3,16200E-05	3,16261E-05	3,15371E-05	3,15456E-05	3,16923E-05	3,18011E-05	3,16877E-05	3,14707E-05	3,14666E-05
0,0016	0,01	3,10153E-06	3,09738E-06	3,09336E-06	3,10273E-06	3,12549E-06	3,13411E-06	3,13726E-06	3,14122E-06	3,14370E-06
	0,05	1,57095E-05	1,57124E-05	1,56442E-05	1,56729E-05	1,57576E-05	1,58154E-05	1,57709E-05	1,57205E-05	1,57254E-05
	0,1	3,16311E-05	3,16750E-05	3,14766E-05	3,15296E-05	3,16933E-05	3,18261E-05	3,16989E-05	3,14723E-05	3,14566E-05
0,002	0,01	3,10112E-06	3,09645E-06	3,09229E-06	3,10232E-06	3,12556E-06	3,13394E-06	3,13752E-06	3,14133E-06	3,14579E-06
	0,05	1,57078E-05	1,56709E-05	1,56290E-05	1,56663E-05	1,57543E-05	1,58062E-05	1,57681E-05	1,57207E-05	1,57323E-05
	0,1	3,16283E-05	3,15455E-05	3,14397E-05	3,15084E-05	3,16788E-05	3,17989E-05	3,16877E-05	3,14700E-05	3,14676E-05

Tabla 11 – Datos completo cálculo de convergencia (Fuente: propia)

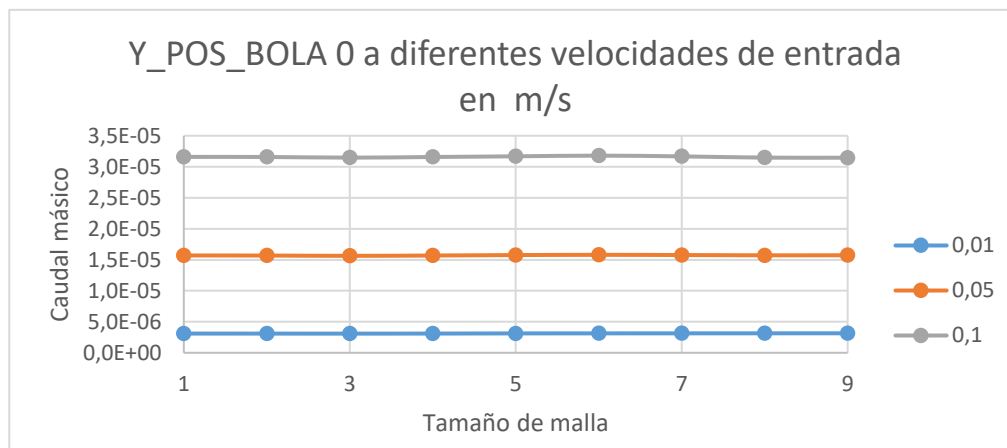


Gráfico 10 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 0 a diferentes velocidades (Fuente: propia)

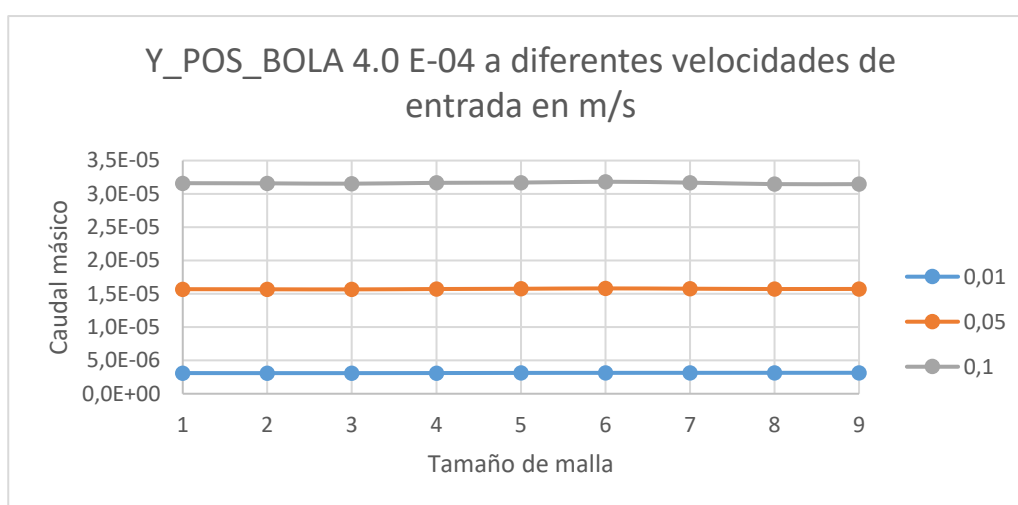


Gráfico 8 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 4.0 E-04 a diferentes velocidades (Fuente: propia)

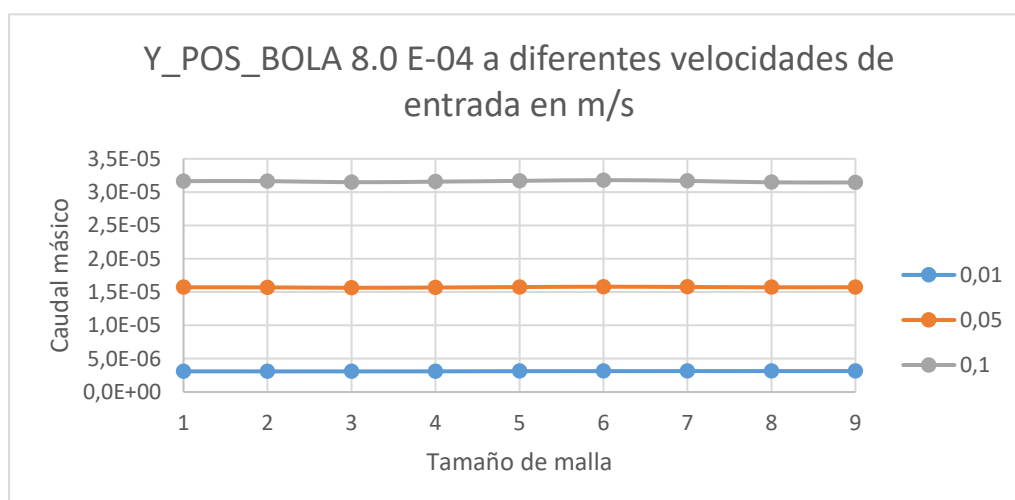


Gráfico 9 – Convergencia de caudal volumétrico para Y_POS_BOLA = 8.0 E-04 a diferentes velocidades (Fuente: propia)

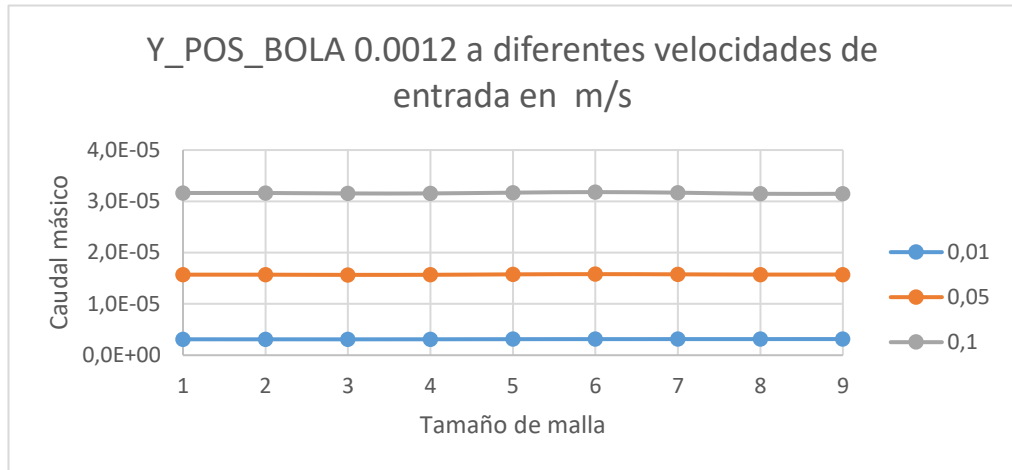


Gráfico 11 – Convergencia de caudal volumétrico para $Y_POS_BOLA = 0,0012$ a diferentes velocidades (Fuente: propia)

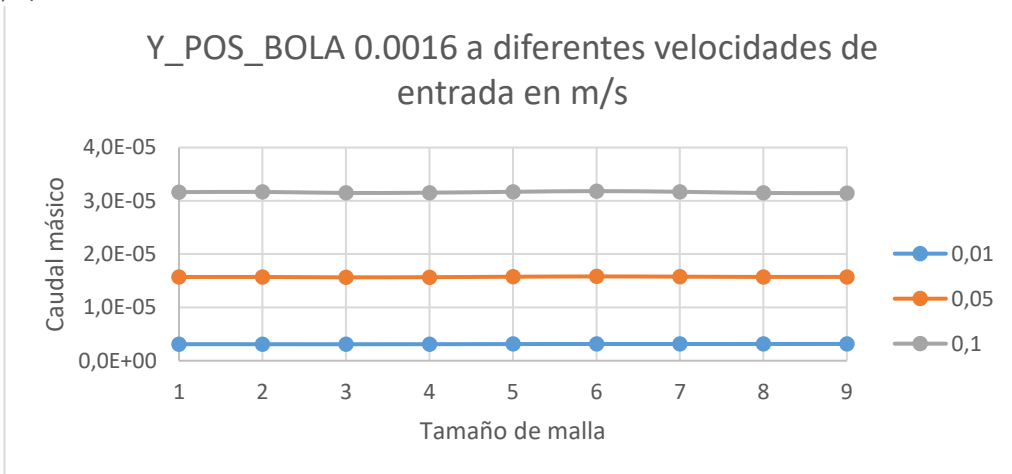


Gráfico 12 – Convergencia de caudal volumétrico para $Y_POS_BOLA = 0,0016$ a diferentes velocidades (Fuente: propia)

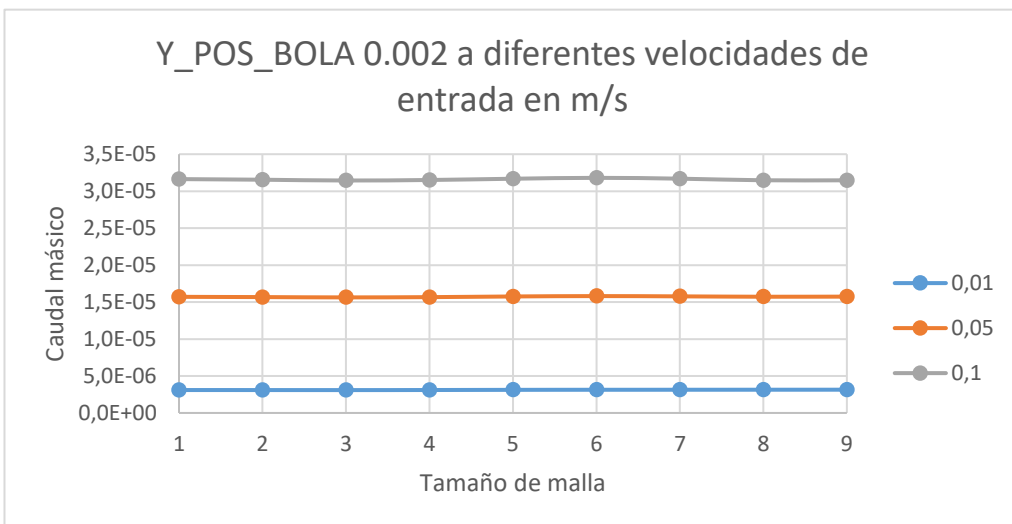


Gráfico 13 – Convergencia de caudal volumétrico para $Y_POS_BOLA = 0,002$ a diferentes velocidades (Fuente: propia)

Anexo C – Cálculo por presión

En ésta sección se muestran de manera ordenada el conjunto completo de resultados en los valores de presión desde 3000 Pa hasta 4250 Pa. En lo referente a las tablas, se observa una primera columna con la posición de la bola en el momento de la evaluación. La segunda columna corresponde al valor de la magnitud a la entrada de la válvula. La tercera y última columna corresponde al valor de la magnitud a la salida de la válvula. En lo referente a las imágenes, se observa un corte longitudinal de la válvula para observar la velocidad en cada punto a estudio de la válvula, un gráfico de presión sobre las superficies que conforman la válvula a lo largo del avance del flujo y un corte de presiones en las diferentes posiciones de la válvula. De nuevo habrá una imagen por cada posición de la bola.

- Output P = 3000 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,066022403	0,81742925
4,00E-04	0,062495967	0,775451723
8,00E-04	0,058125485	0,720239161
0,0012	0,058731575	0,727990281
0,0016	0,050090795	0,620523755

Tabla 14 – UO IN – OUT P= 3000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	2999,945158	256,2683141
4,00E-04	2999,950738	234,1130537
8,00E-04	2999,957682	186,7411881
0,0012	2999,957198	196,3001329
0,0016	2999,968782	130,8086028

Tabla 13 – P IN – OUT P= 3000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2,05E-05	2,08E-05
4,00E-04	1,94E-05	1,98E-05
8,00E-04	1,81E-05	1,84E-05
0,0012	1,83E-05	1,86E-05
0,0016	1,56E-05	1,58E-05

Tabla 12 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3000 Pa (Fuente: propia)

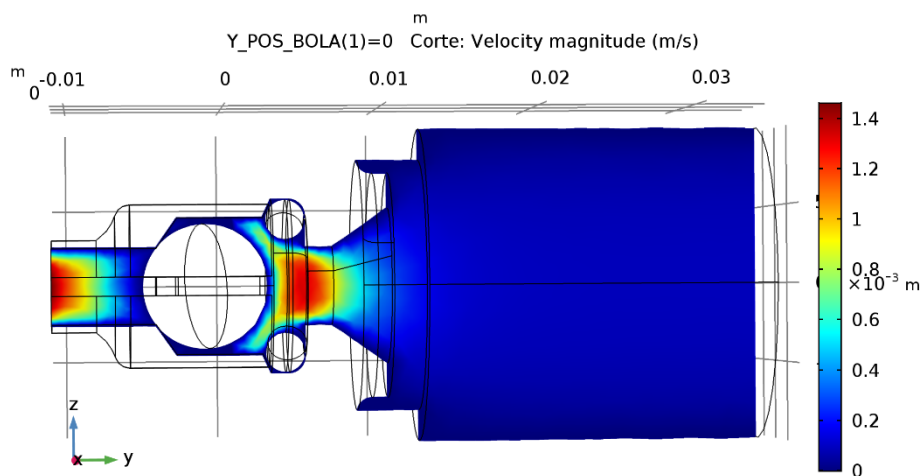


Ilustración 27 – Corte UO Y_POS_BOLA=0 P=3000 Pa (Fuente: propia)

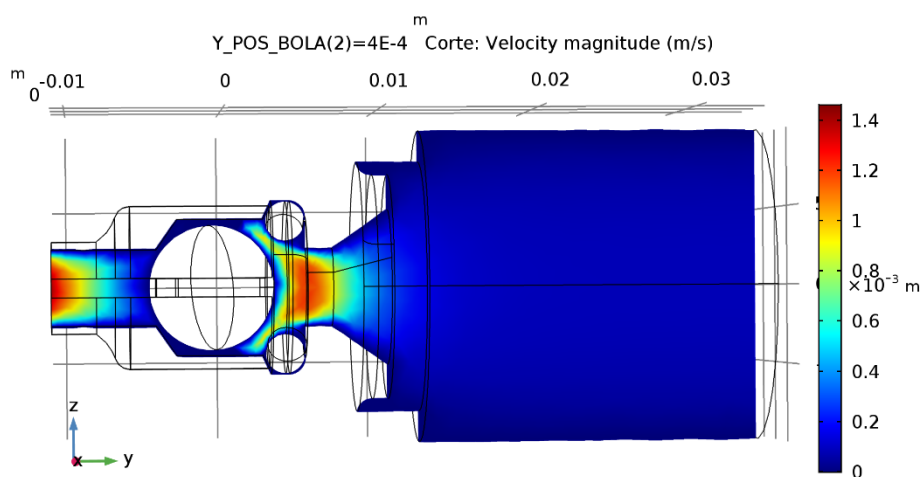


Ilustración 26 – Corte UO Y_POS_BOLA=4E-4 P= 3000 Pa (Fuente: propia)

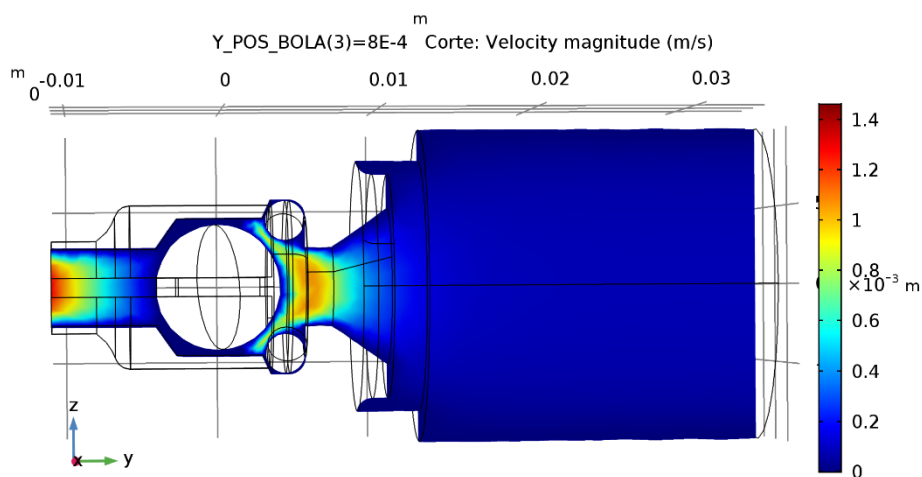
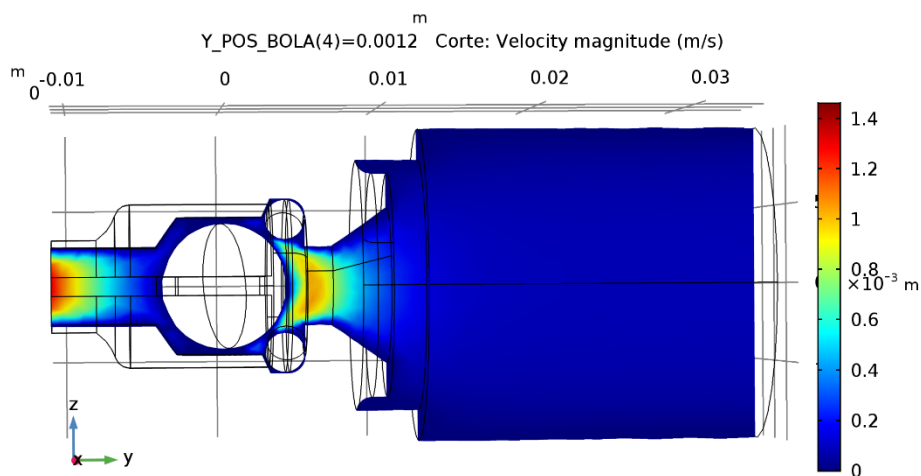
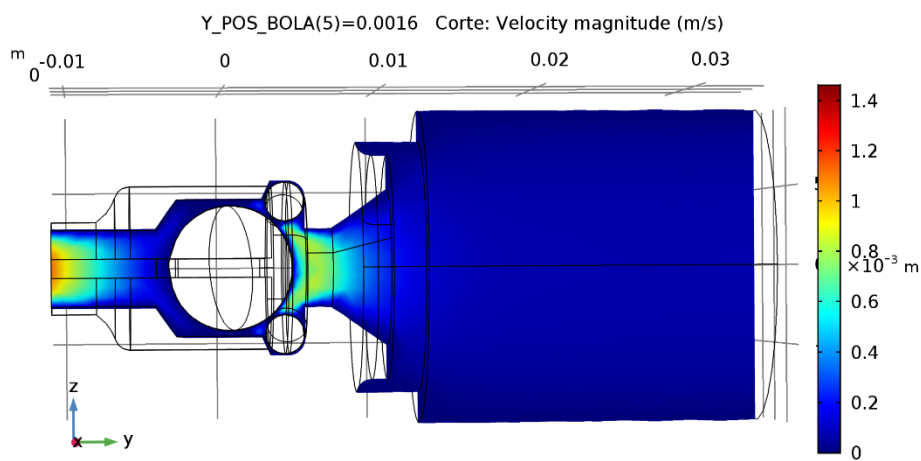


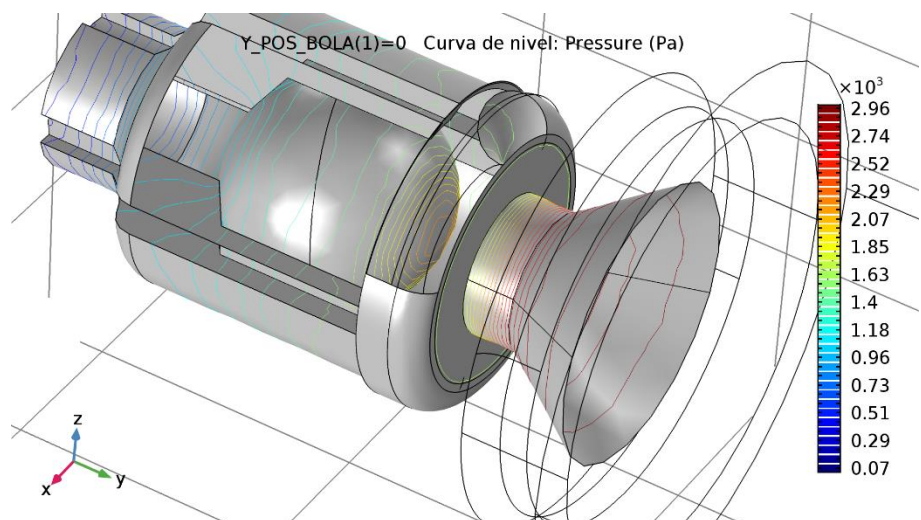
Ilustración 25 – Corte UO Y_POS_BOLA=8E-4 P= 3000 Pa (Fuente: propia)



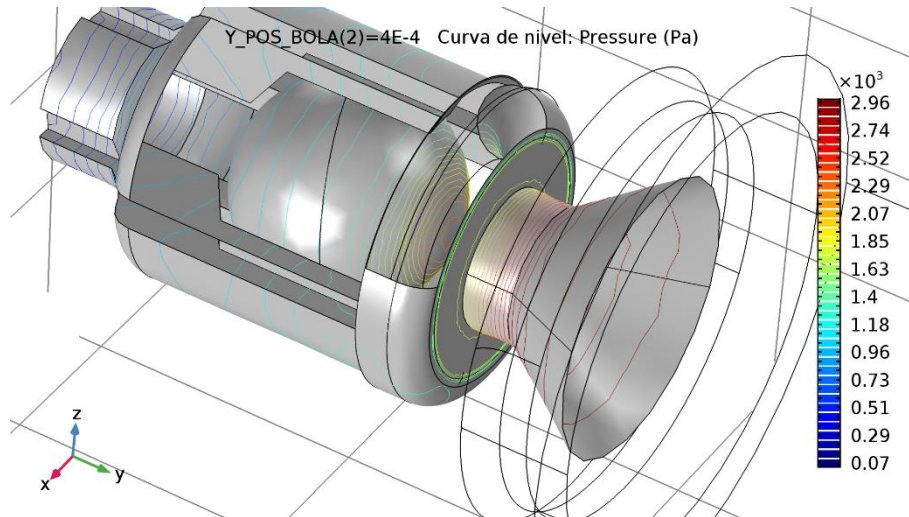
Il·lustració 30 – Corte UO Y_POS_BOLA=0.0012 P=3000 Pa (Fuente: propia)



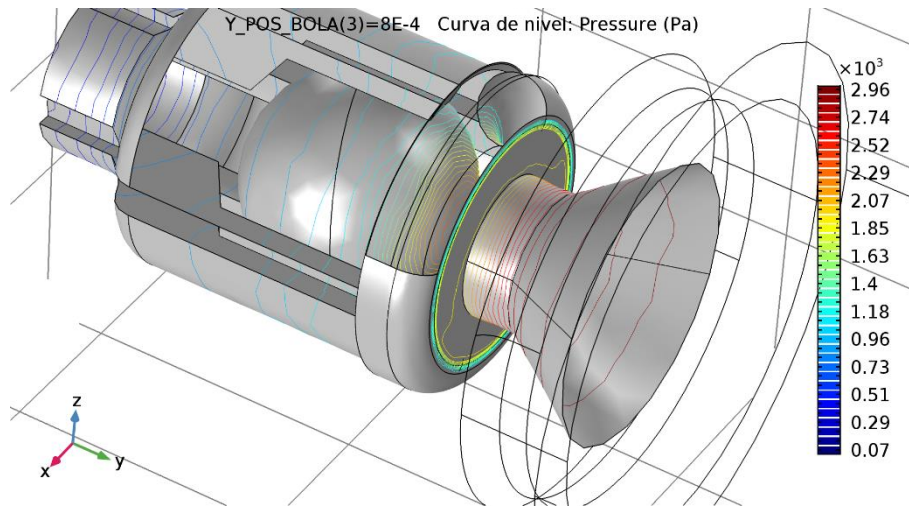
Il·lustració 29 – Corte Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)



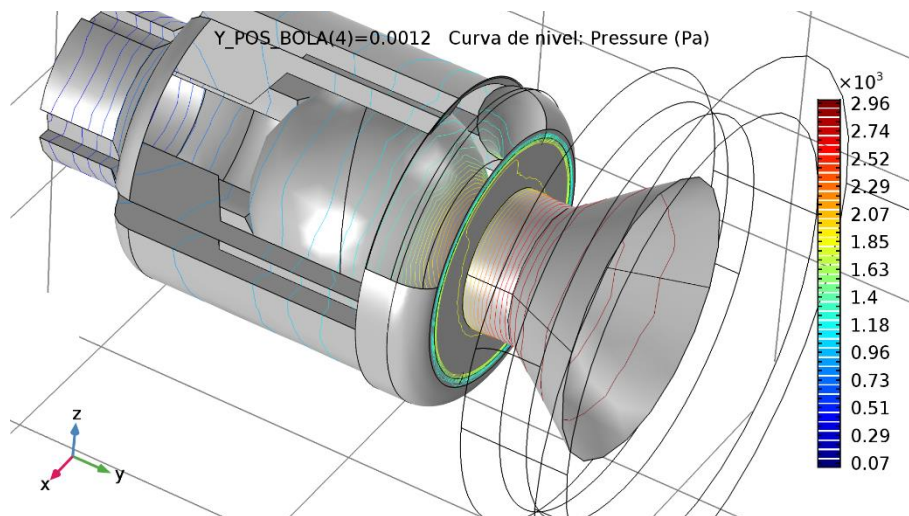
Il·lustració 28 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3000 Pa (Fuente: propia)



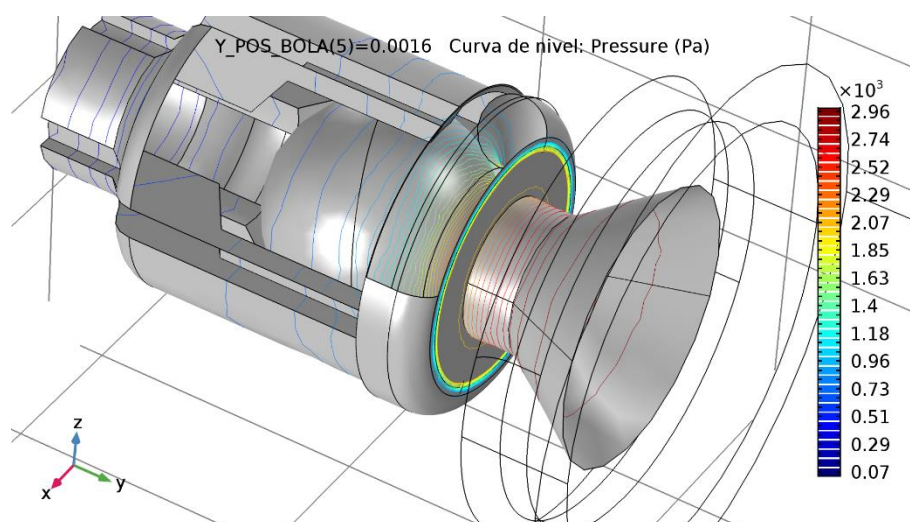
Il·lustració 33 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3000 Pa (Fuente: propia)



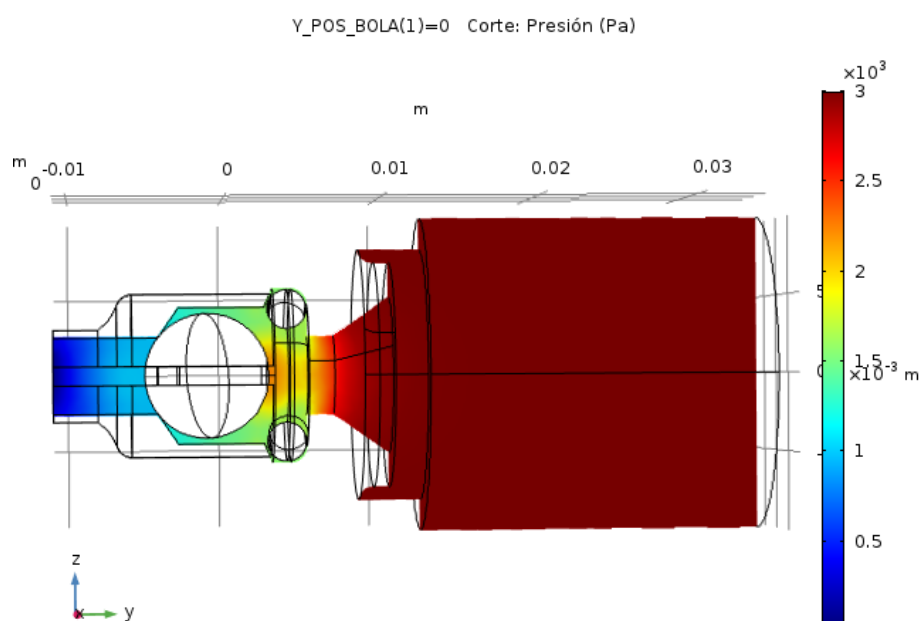
Il·lustració 32 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 31 –P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P= 3000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 34 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 35– P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3000 Pa (Fuente: propia)

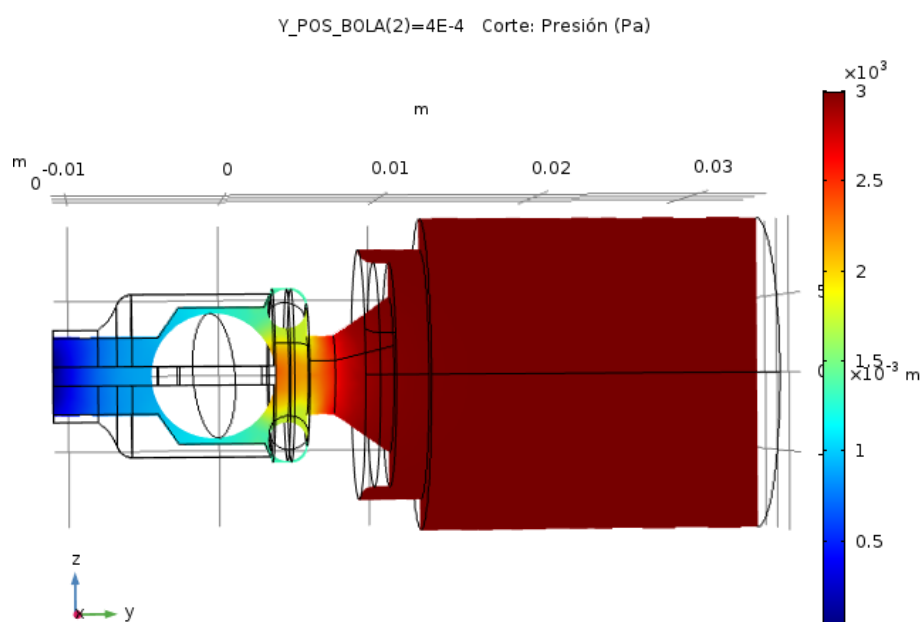


Ilustración 36— P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3000 Pa (Fuente: propia)

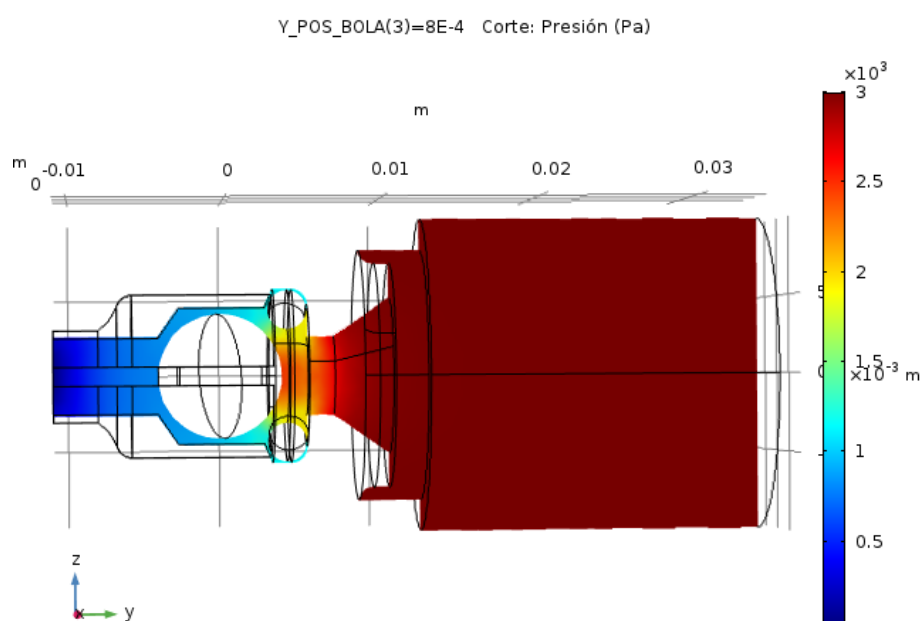
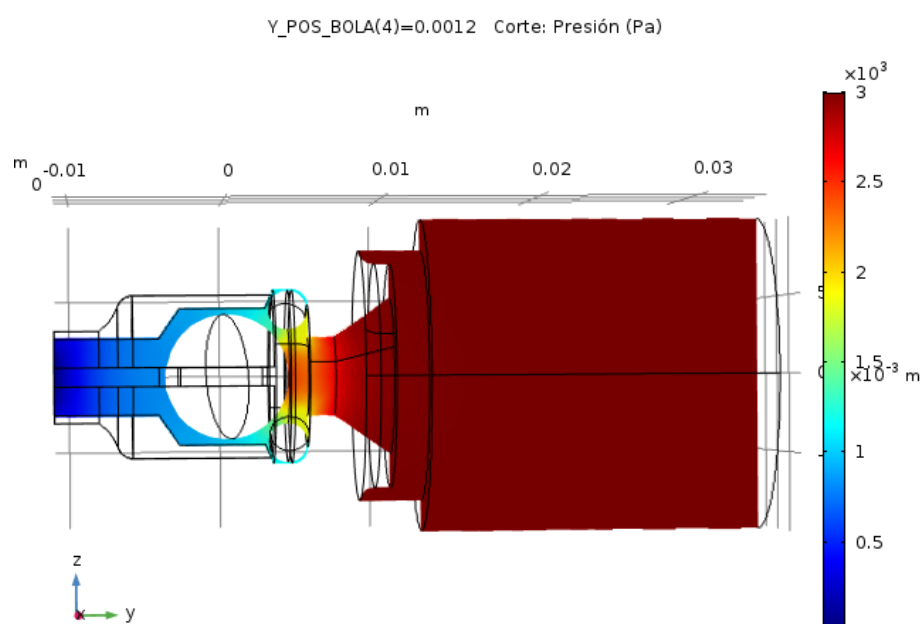
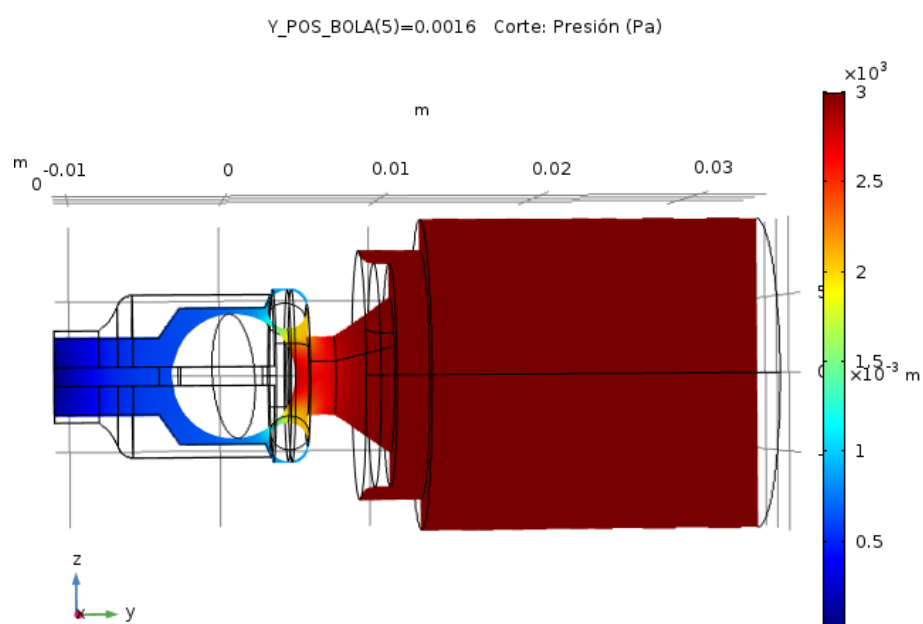


Ilustración 37— P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 38– P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 39 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3000 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 3125 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,067408763	0,834723003
4,00E-04	0,063813745	0,791950683
8,00E-04	0,059360015	0,735662795
0,0012	0,060030605	0,744221618
0,0016	0,05128665	0,635459467

Tabla 17 – U0 IN-OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3124,942804	269,3775131
4,00E-04	3124,9487	246,1792786
8,00E-04	3124,955859	196,3584931
0,0012	3124,955326	206,7878191
0,0016	3124,96728	138,4329856

Tabla 16 – P IN-OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2,0970997990E-05	2,1275100796E-05
4,00E-04	1,9852580966E-05	2,0184936240E-05
8,00E-04	1,8467016749E-05	1,8750292068E-05
0,0012	1,8675638776E-05	1,8968436091E-05
0,0016	1,5955377118E-05	1,6196347949E-05

Tabla 15 – Caudal Volumétrico IN-OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)

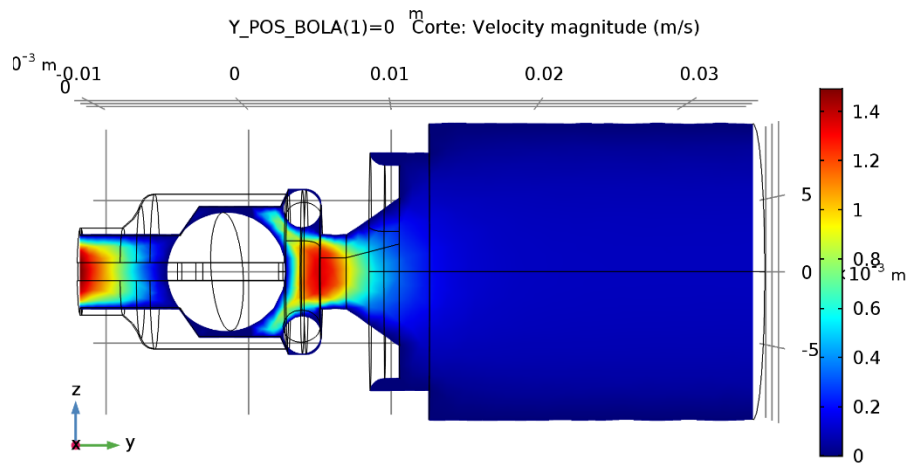


Ilustración 40 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3125 Pa (Fuente: propia)

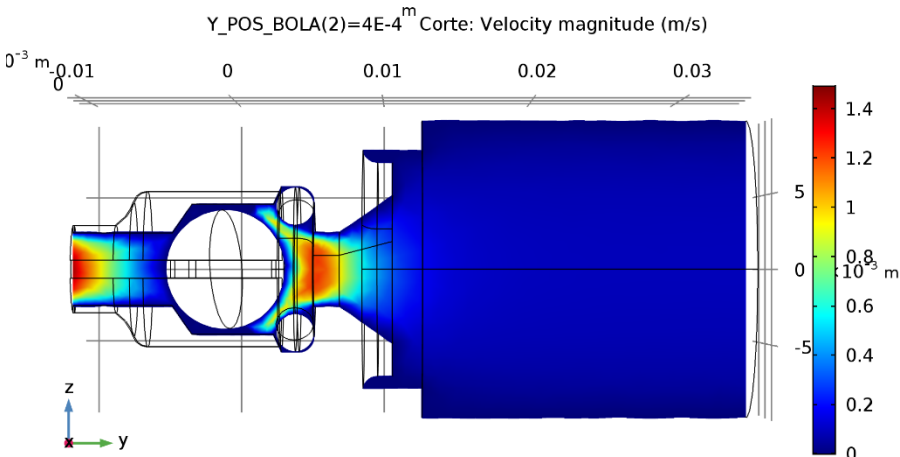


Ilustración 43 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)

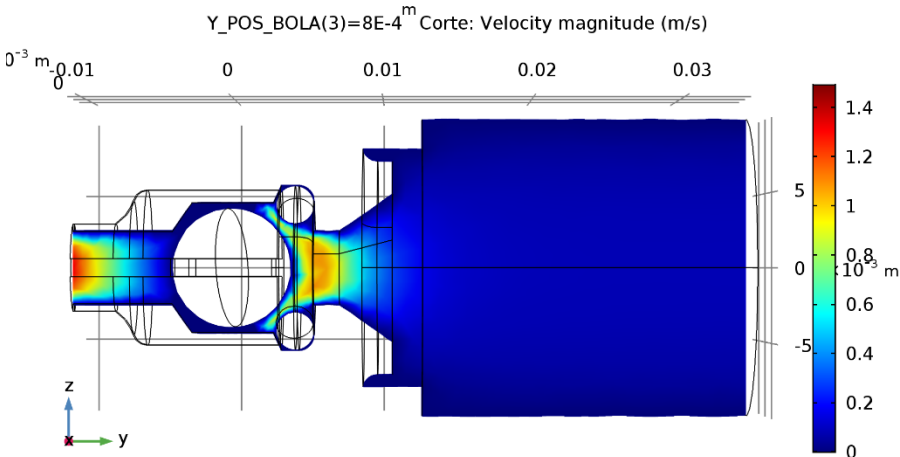


Ilustración 42 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)

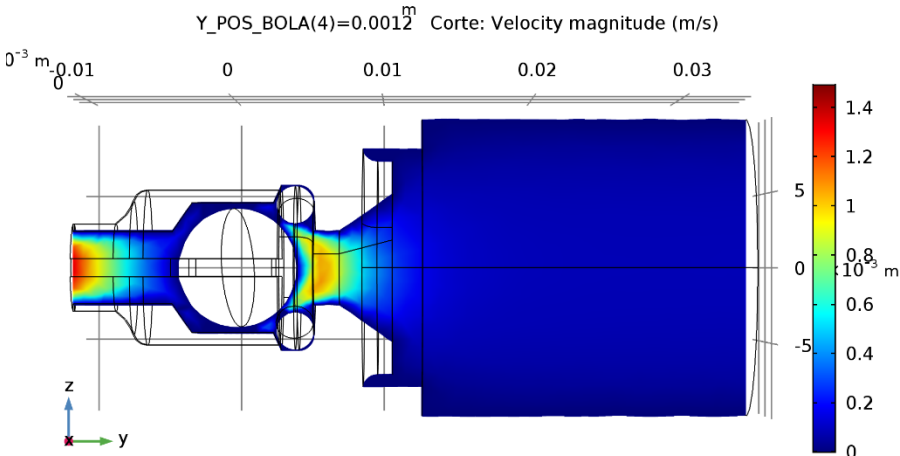


Ilustración 41 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3125 Pa (Fuente: propia)

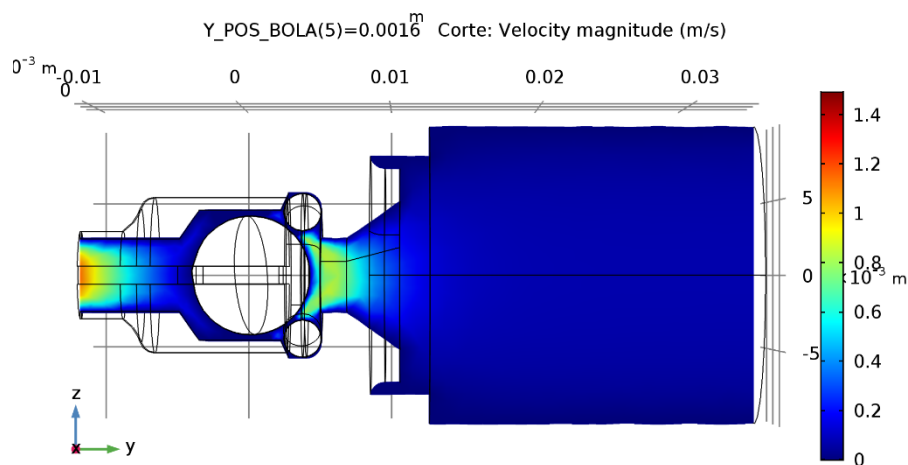


Ilustración 46 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3125 Pa (Fuente: propia)

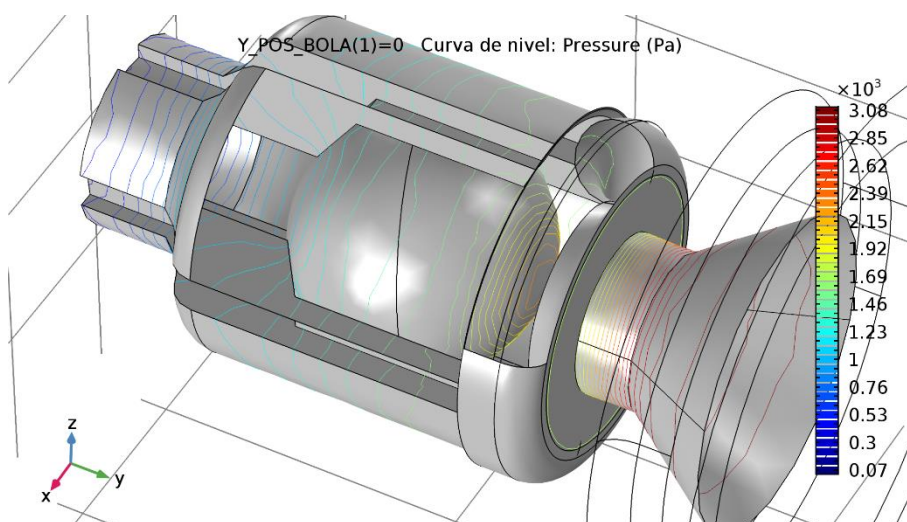


Ilustración 45- P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3125 Pa (Fuente: propia)

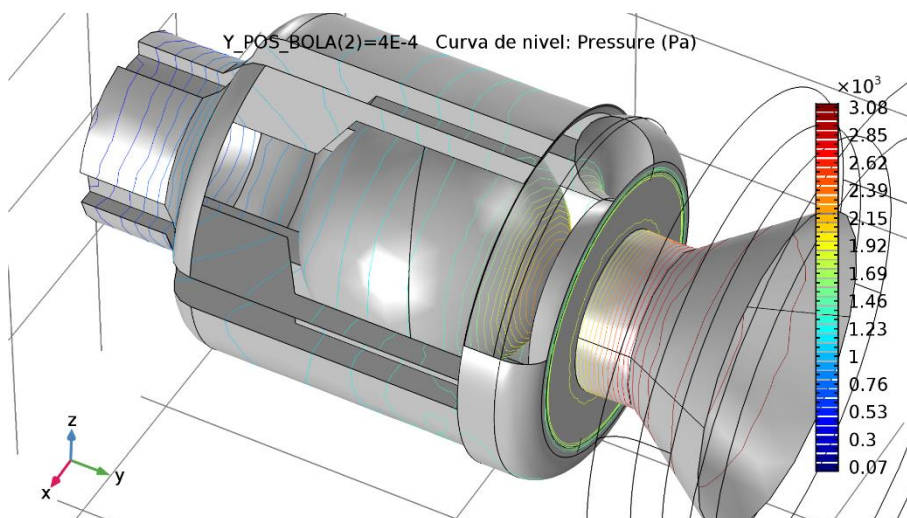
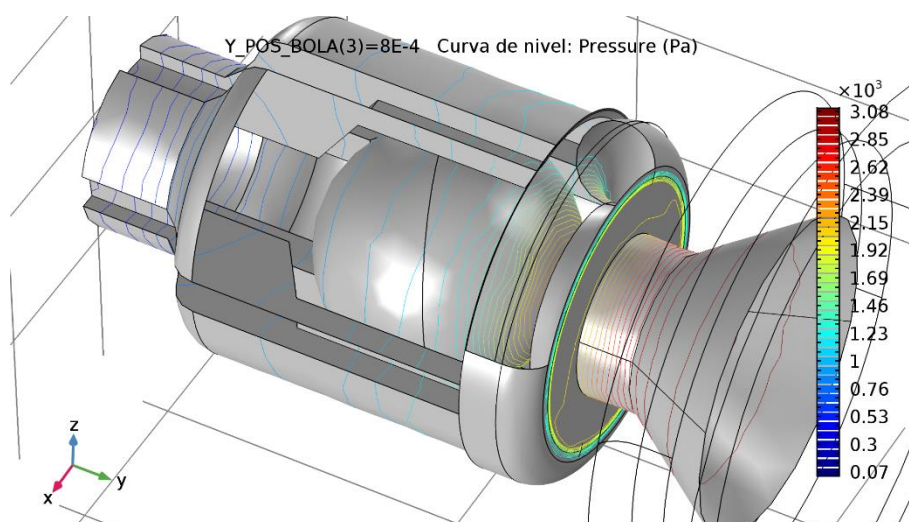
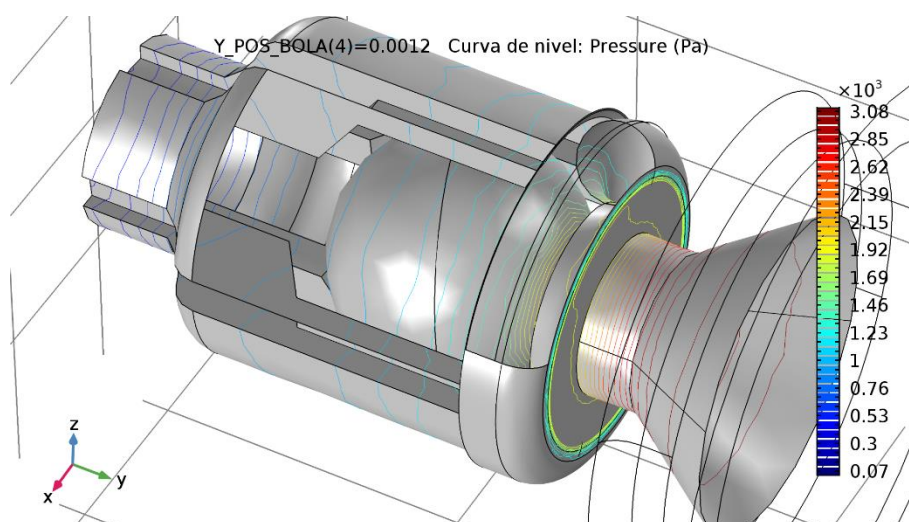


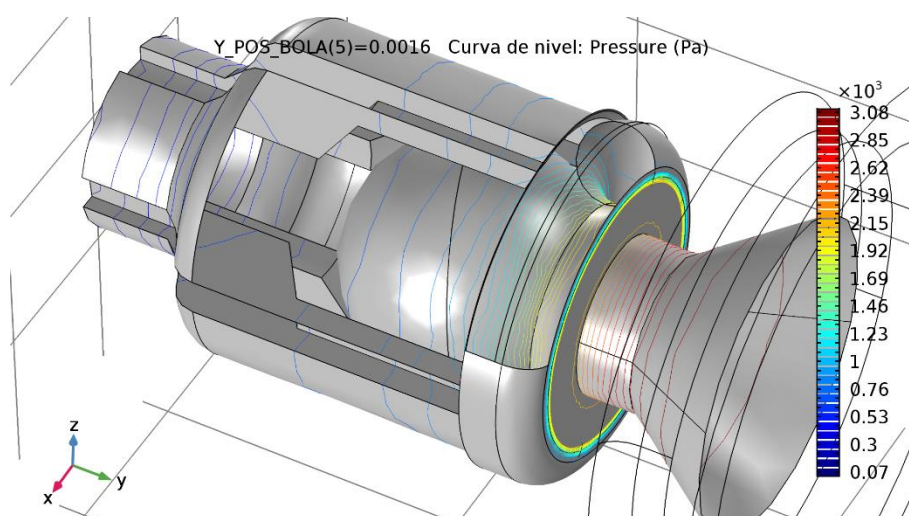
Ilustración 44 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)



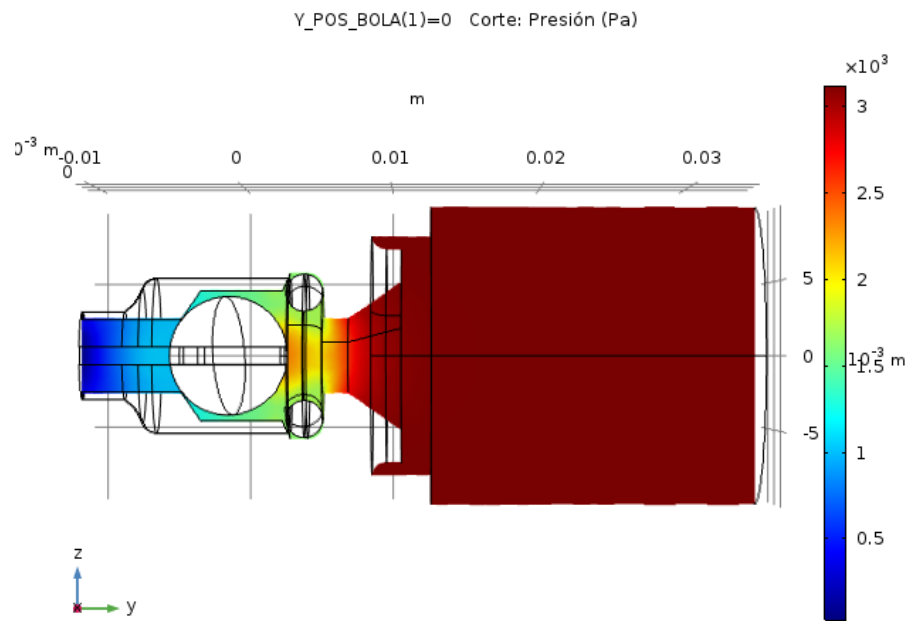
Il·lustració 49 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)



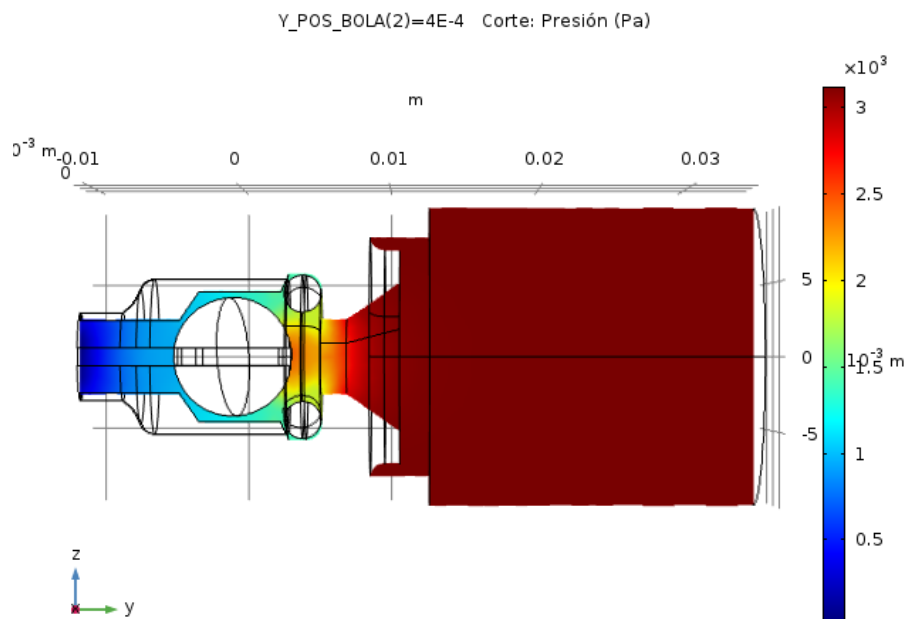
Il·lustració 47 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3125 Pa (Fuente: propia)



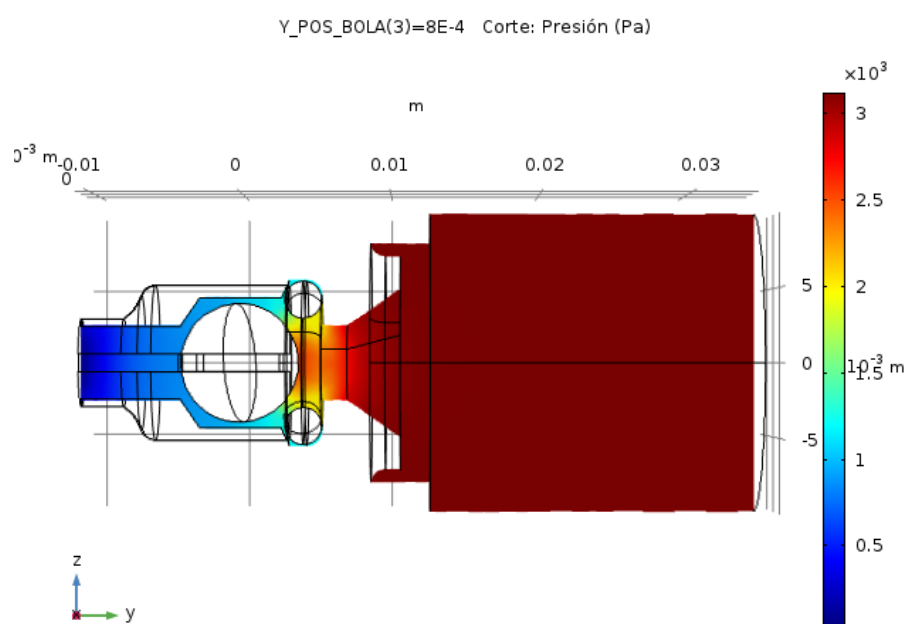
Il·lustració 48 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3125 Pa (Fuente: propia)



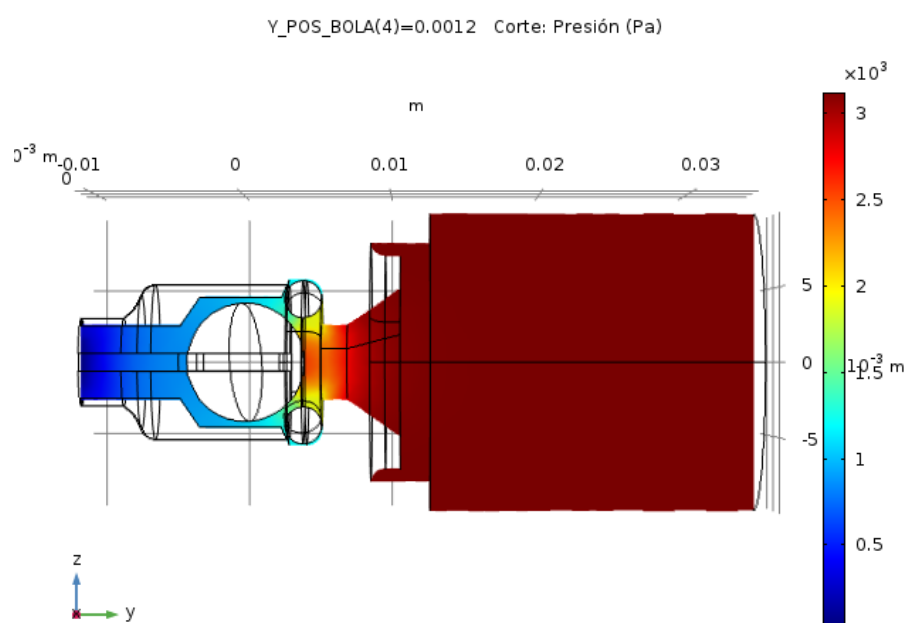
Il·lustració 51 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 50 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 53 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 52 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3125 Pa (Fuente: propia)

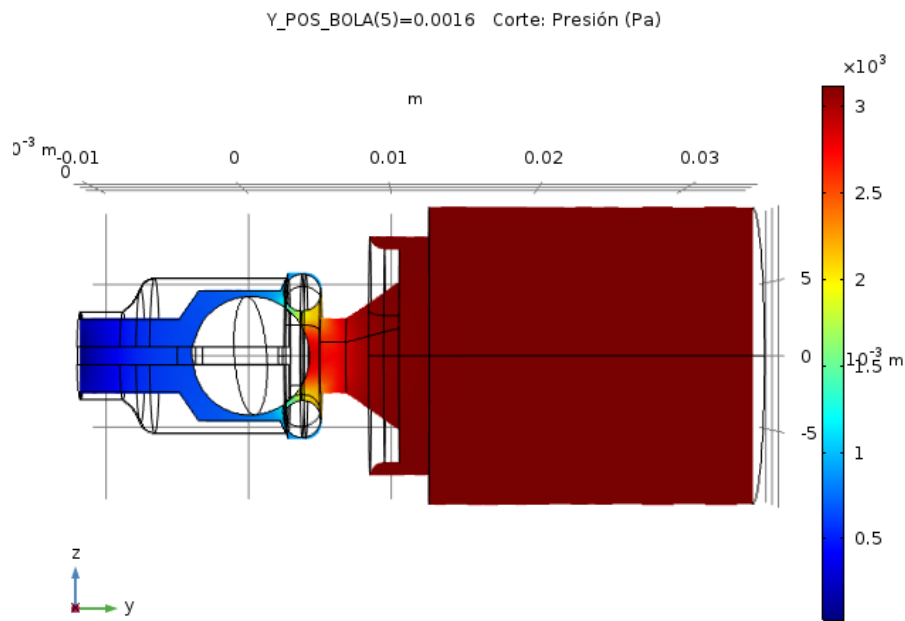


Ilustración 54 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3125 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 3250 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,068767878	0,851680597
4,00E-04	0,065104737	0,808118303
8,00E-04	0,060570263	0,750786547
0,0012	0,061302961	0,760123414
0,0016	0,052460198	0,65011839

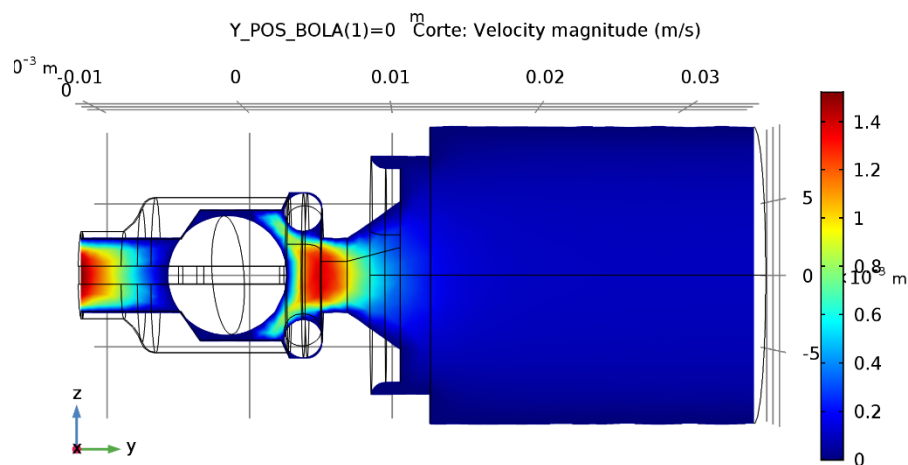
Tabla 20 – U0 IN – OUT P=3250 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3249,9404484799600	282,5915762733410
4,00E-04	3249,9465877174500	258,3378186244750
8,00E-04	3249,9540297844800	206,0520048438500
0,0012	3249,9534009832500	217,3854734316250
0,0016	3249,9657732540700	146,1503306643130

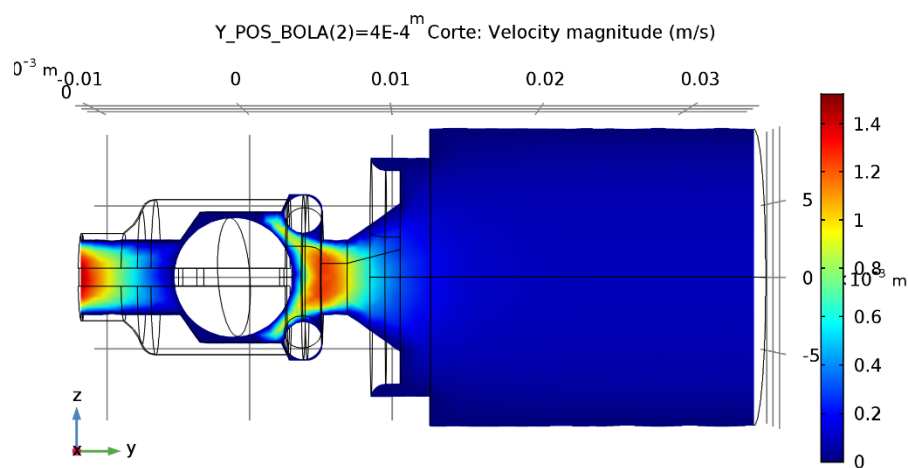
Tabla 18 – P IN – OUT P=3250 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m^3/s)	Velocity magnitude (m^3/s)
0	2.139382142E-05	2.170730947E-05
4.00E-04	2.025421108E-05	2.059701037E-05
8.00E-04	1.884352730E-05	1.913576047E-05
0.0012	1.907147092E-05	1.937373498E-05
0.0016	1.632047032E-05	1.656996898E-05

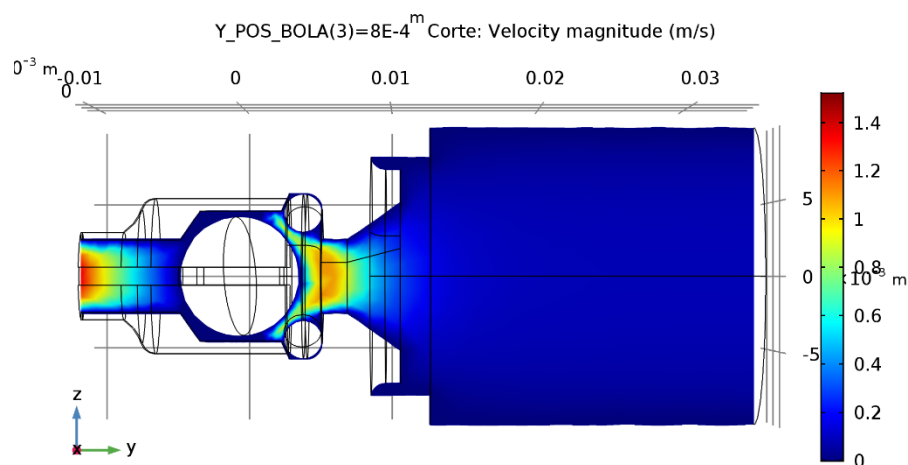
Tabla 19 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3250 (Fuente: propia)



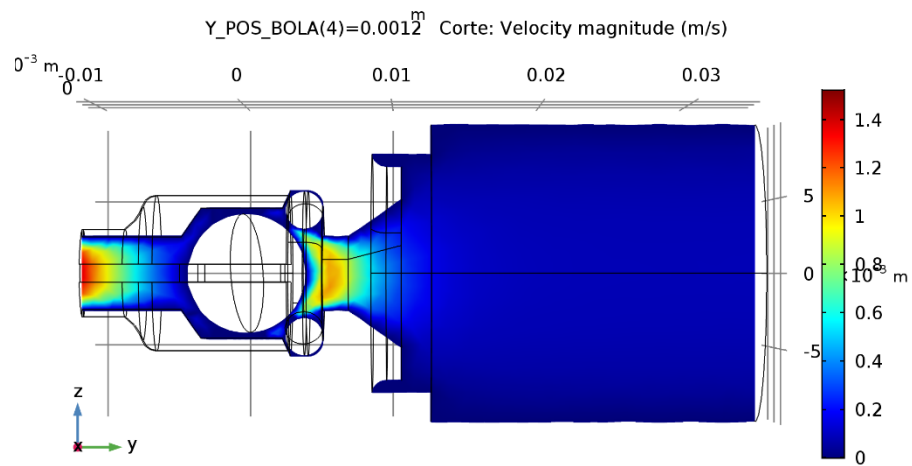
Il·lustració 55 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P= 3250 Pa (Fuente: propia)



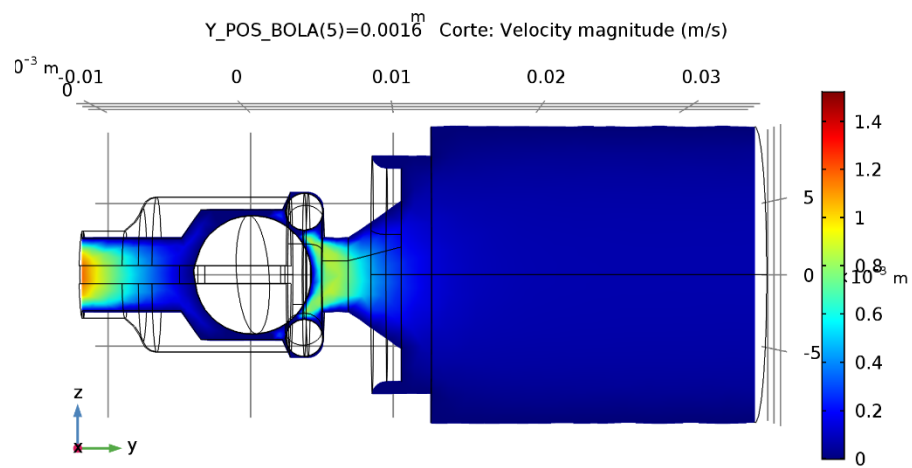
Il·lustració 57 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)



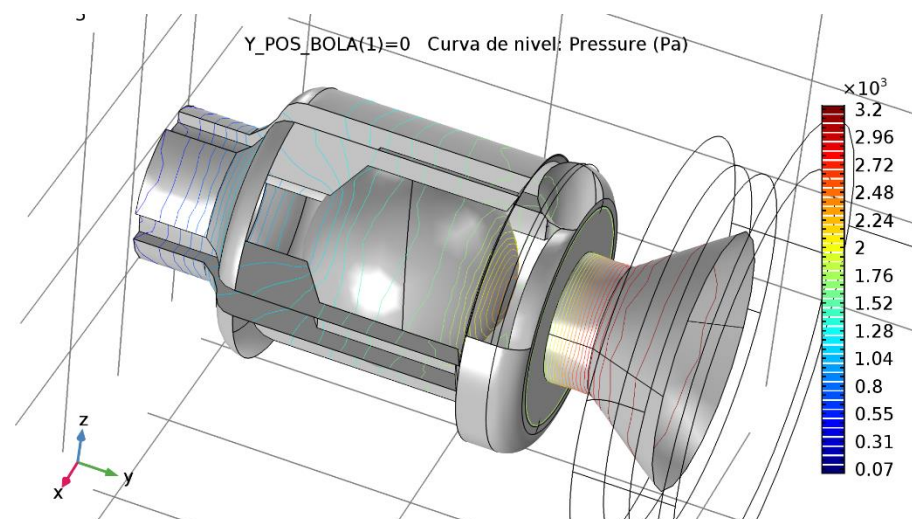
Il·lustració 56 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3250 Pa



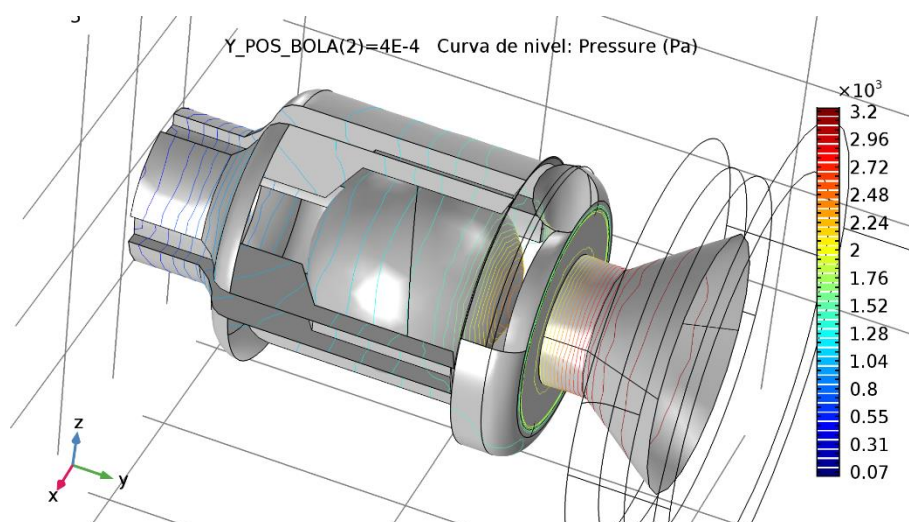
Il·lustració 60 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3250 Pa (Fuente: propia)



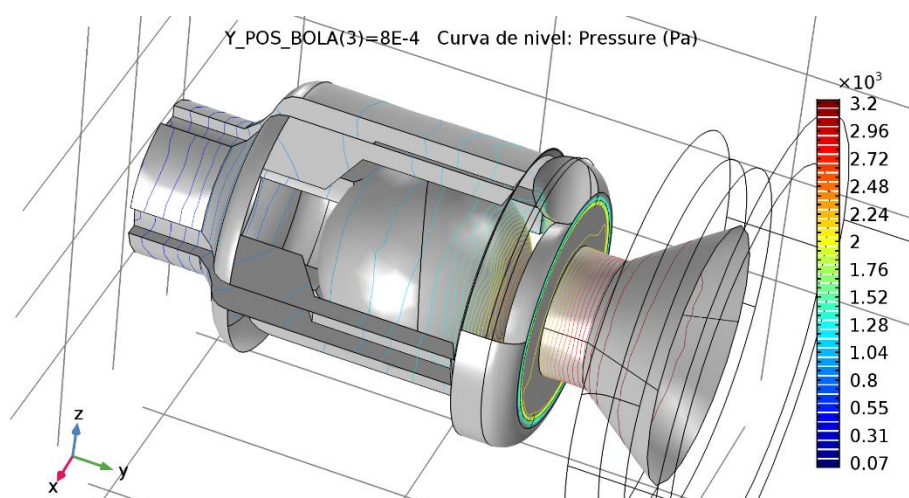
Il·lustració 59 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3250 Pa (Fuente: propia)



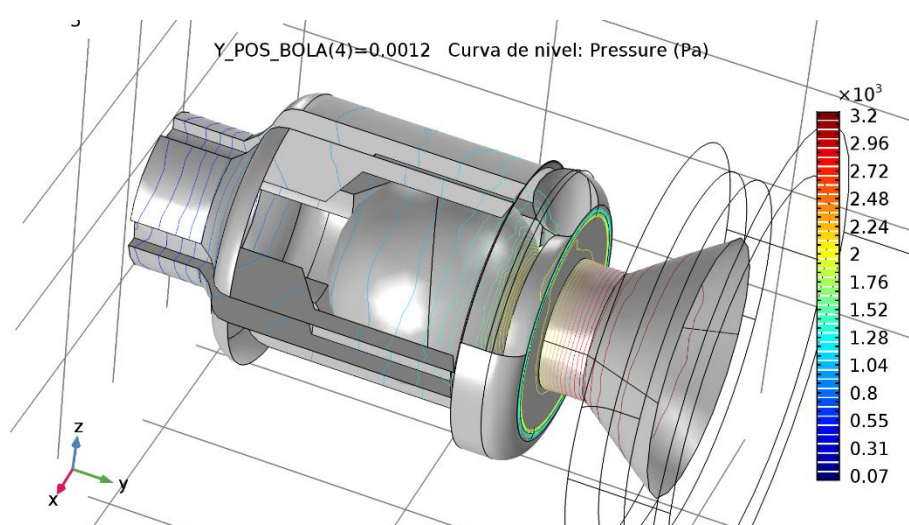
Il·lustració 58 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 61 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 62 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 63 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3250 Pa (Fuente: propia)

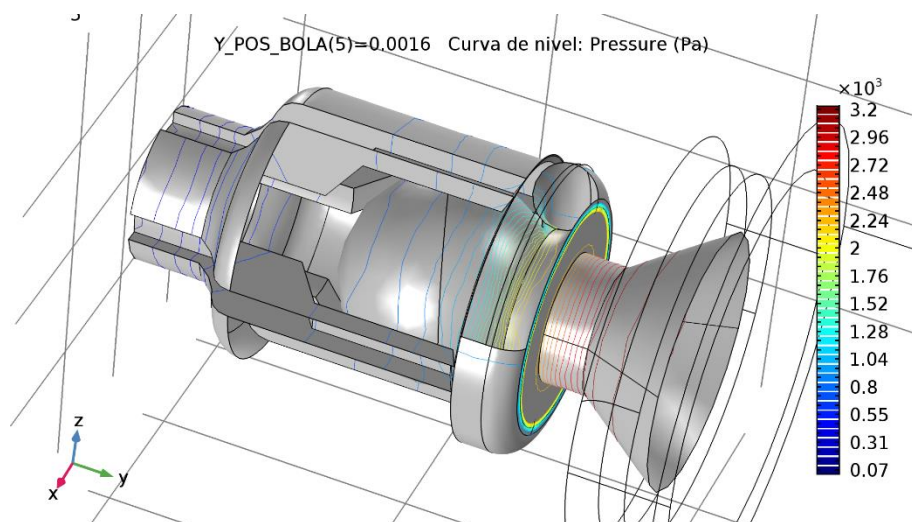


Ilustración 65 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3250 Pa (Fuente: propia)

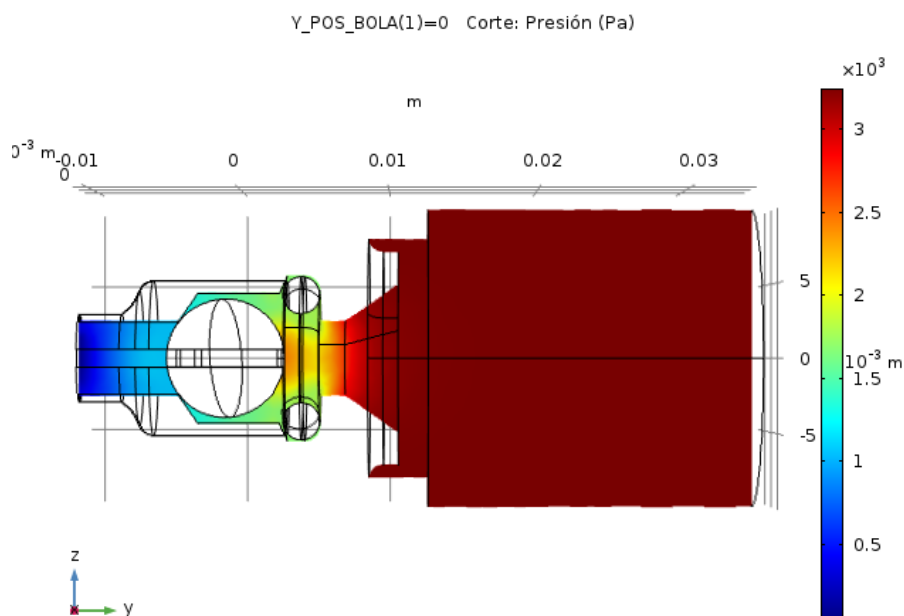
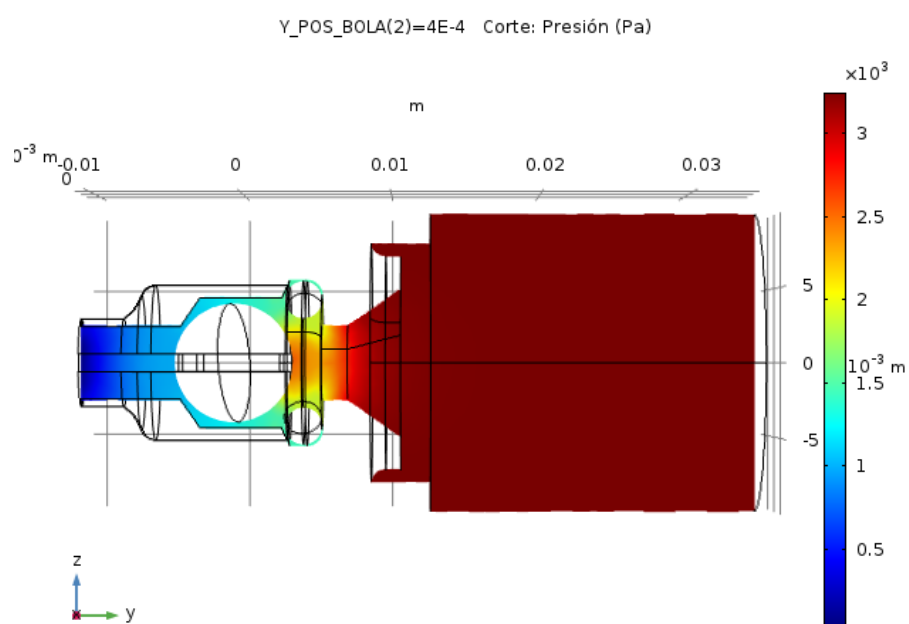
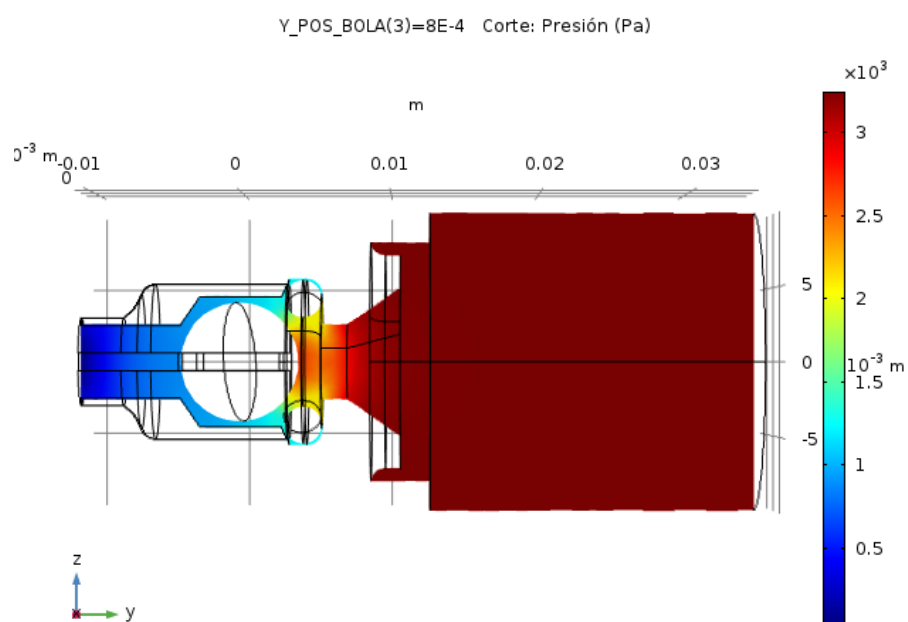


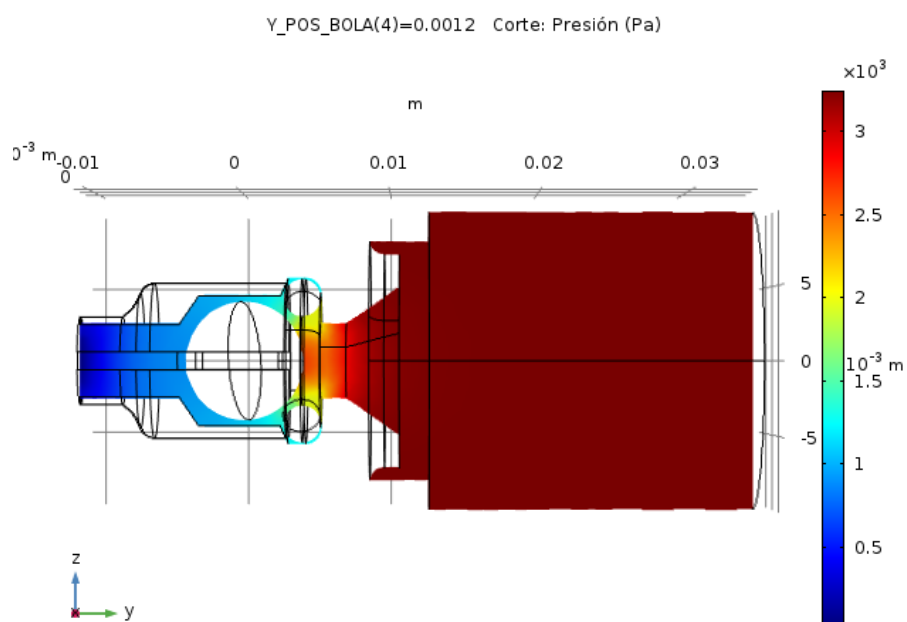
Ilustración 64 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3250 Pa (Fuente: propia)



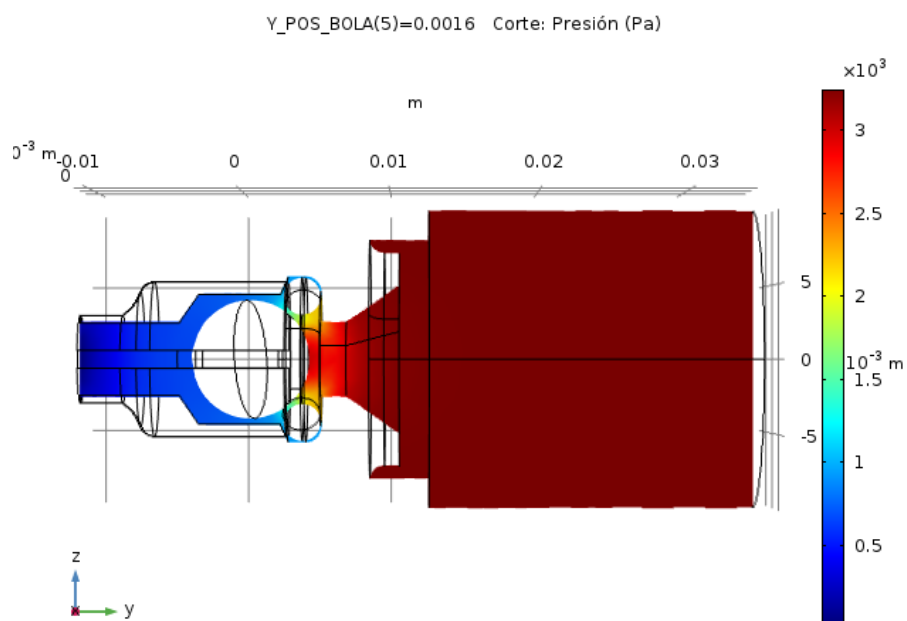
Il·lustració 67 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 66 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 69 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 68 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3250 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 3375 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,070101582	0,868324391
4,00E-04	0,066371334	0,823984186
8,00E-04	0,061757637	0,765629486
0,0012	0,062551518	0,77573135
0,0016	0,053612376	0,664513657

Tabla 23 – U0 IN – OUT P=3375 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3374,93809	295,901103
4,00E-04	3374,94447	270,591716
8,00E-04	3374,9522	215,818463
0,0012	3374,95147	228,089635
0,0016	3374,96426	153,966066

Tabla 22 – P IN – OUT P=3375 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2,180873916E-05	2,213152012E-05
4,00E-04	2,064825196E-05	2,100139393E-05
8,00E-04	1,921292168E-05	1,951407164E-05
0,0012	1,945989973E-05	1,977154410E-05
0,0016	1,667891496E-05	1,693687005E-05

Tabla 21 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3375 Pa (Fuente: propia)

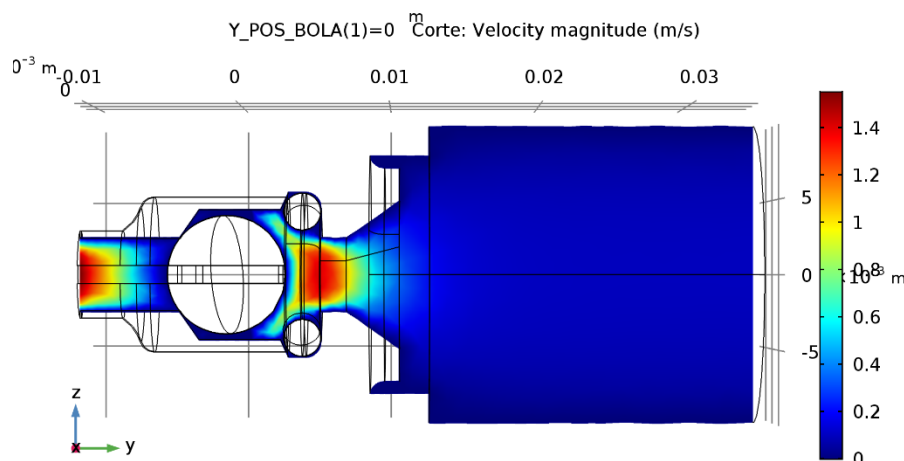


Ilustración 70 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3375 Pa (Fuente: propia)

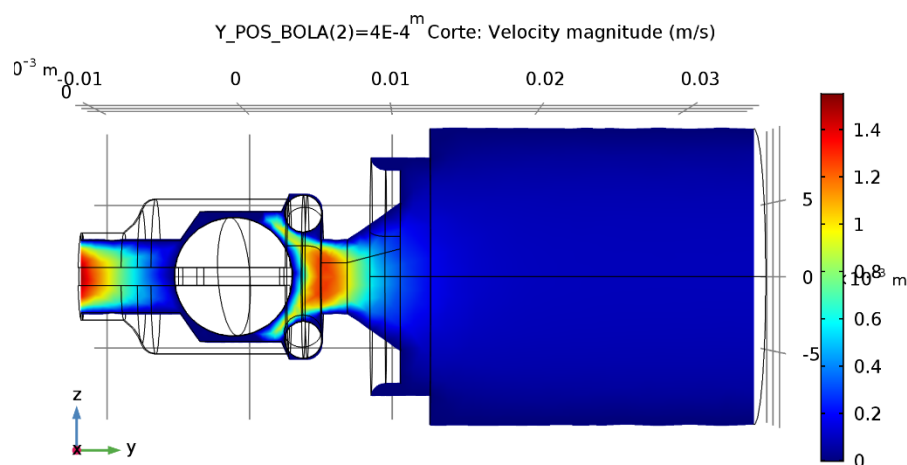


Ilustración 73 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)

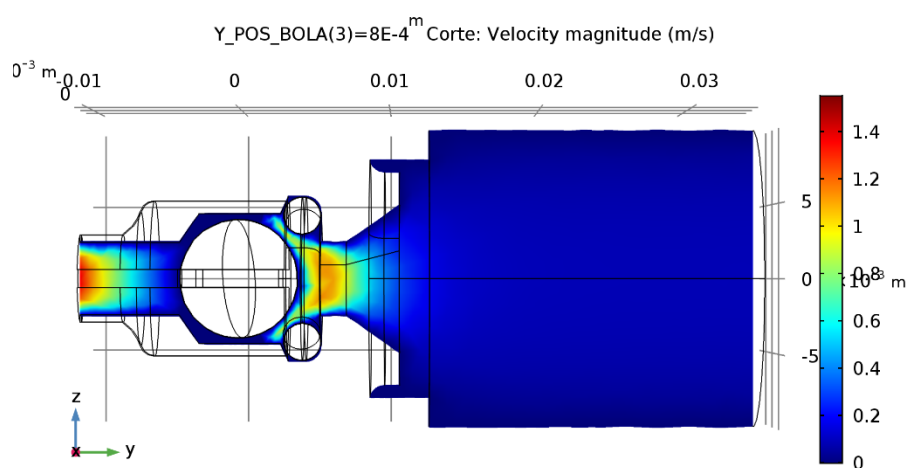


Ilustración 72 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)

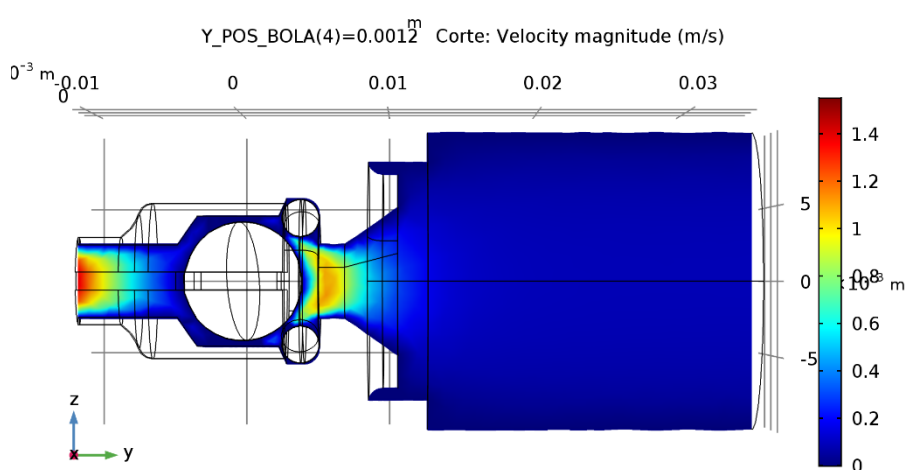
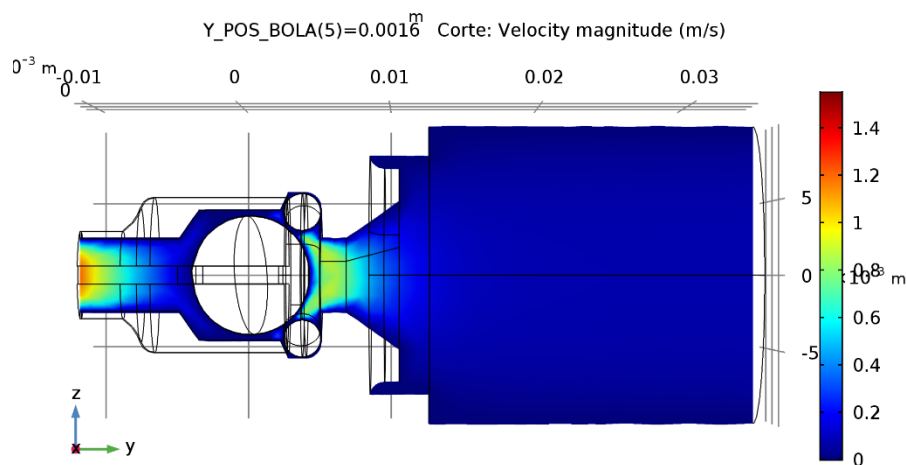
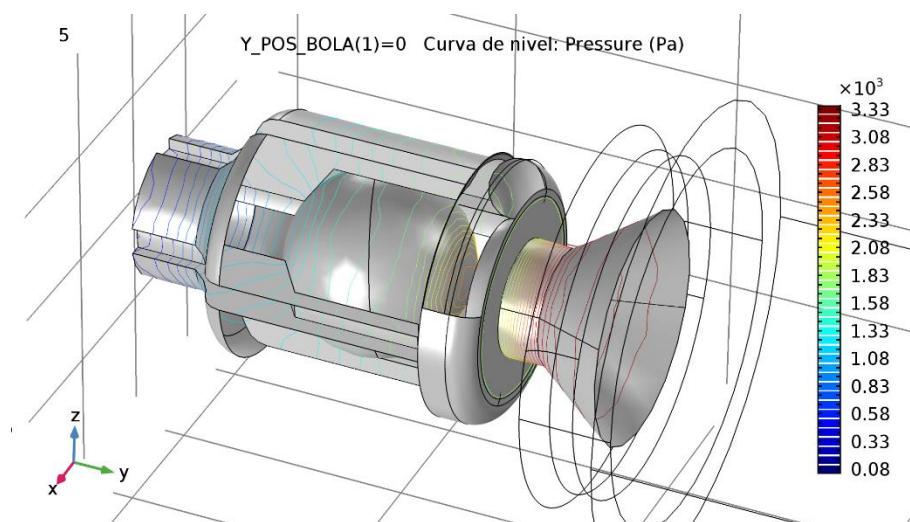


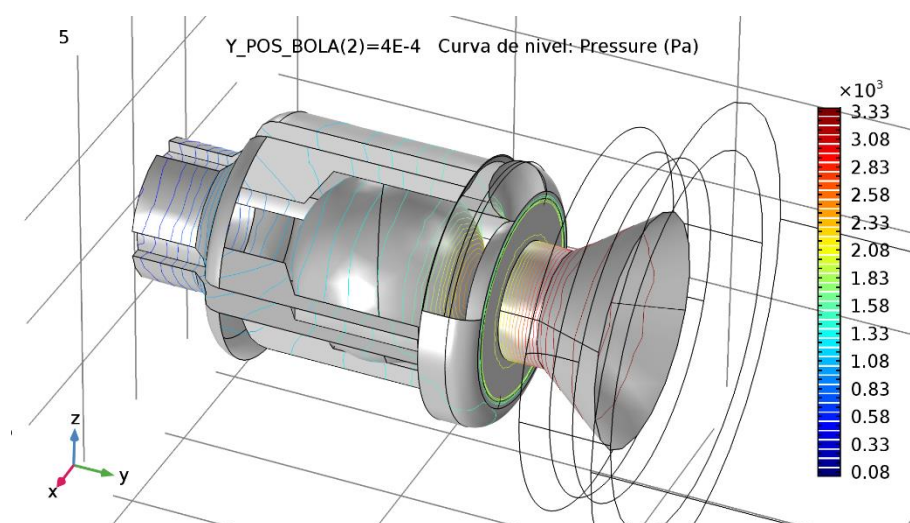
Ilustración 71 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3375 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 76 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3375 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 75 – P lineal Y_POS_BOLA= 0 P=3375 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 74 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)

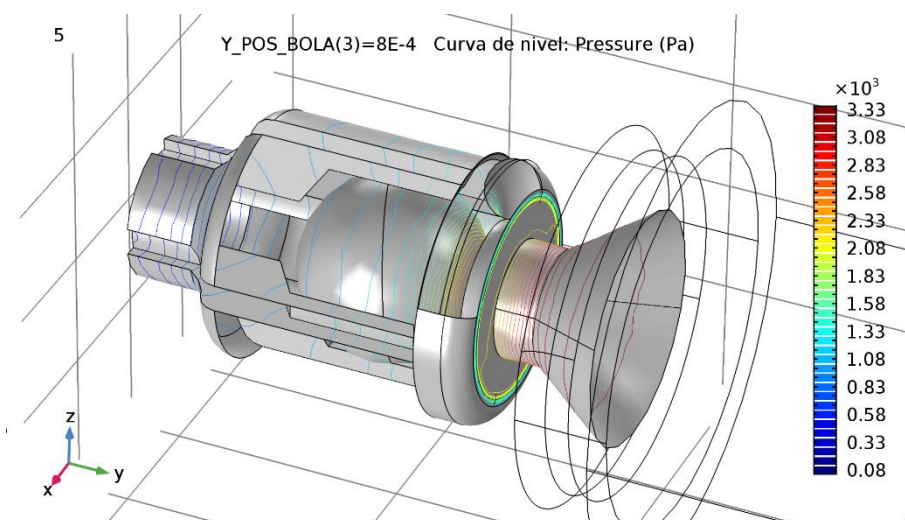


Ilustración 79 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)

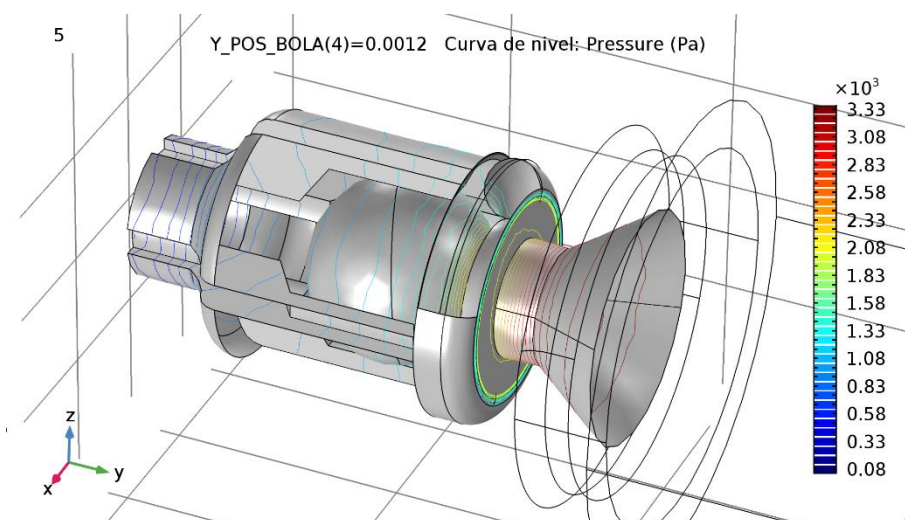


Ilustración 78 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3375 Pa (Fuente: propia)

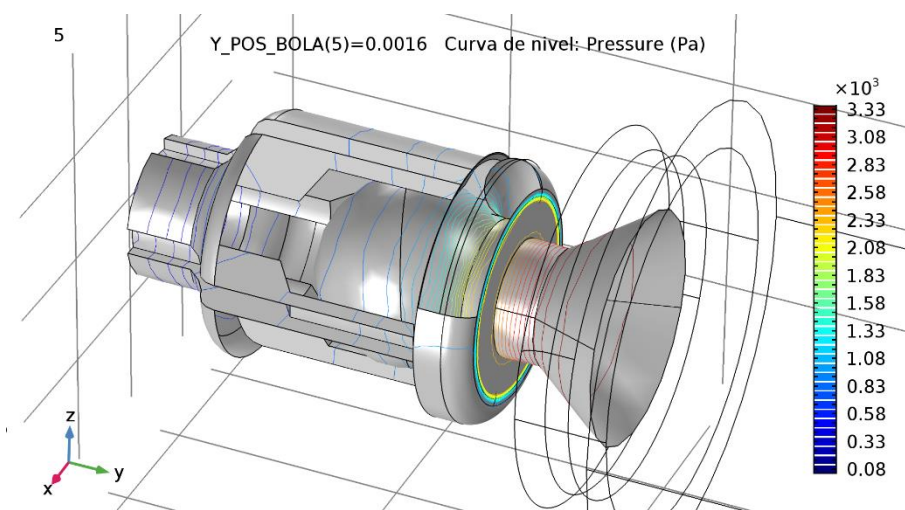
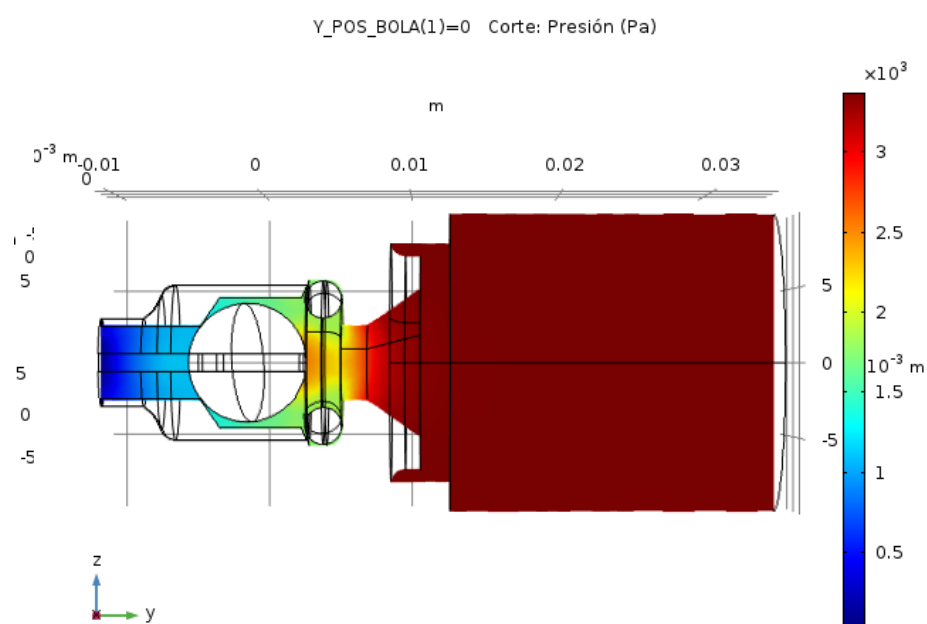
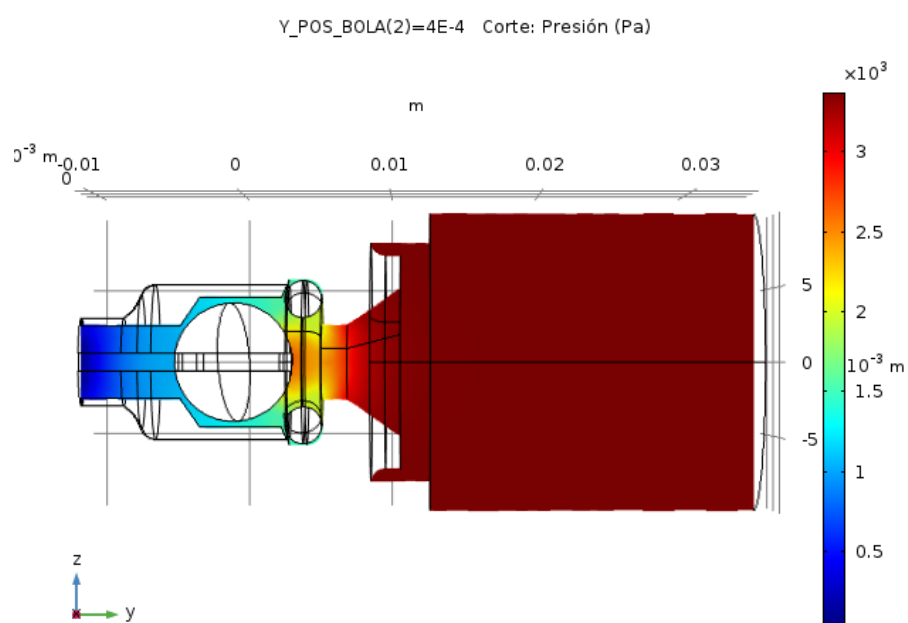


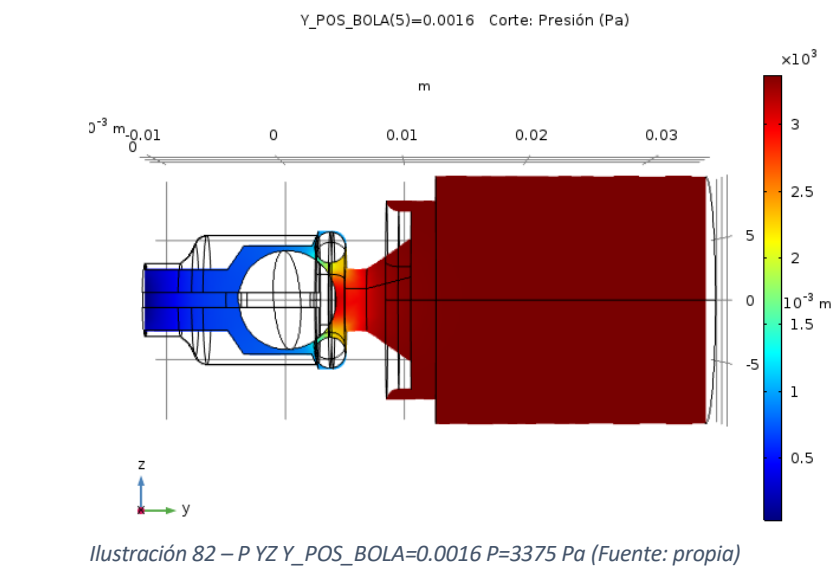
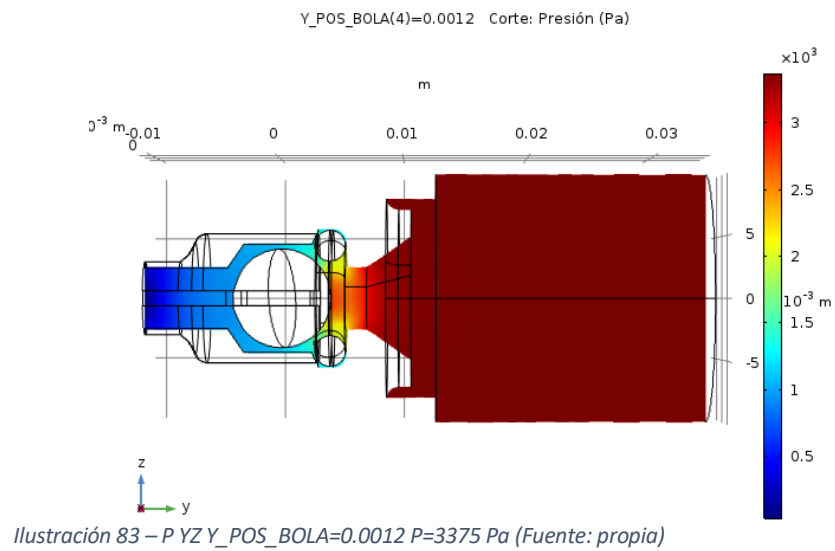
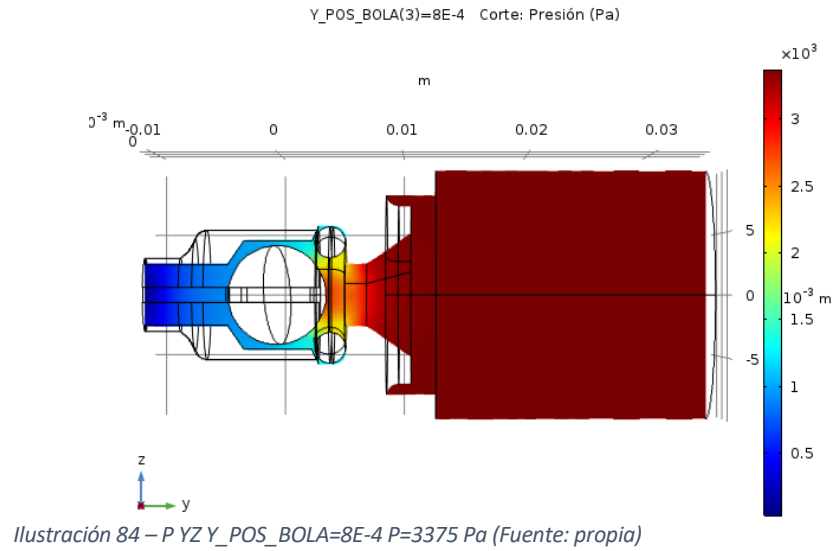
Ilustración 77 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3375 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 81 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3375 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 80 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3375 Pa (Fuente: propia)



- Output P= 3500 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,071411138	0,884669935
4,00E-04	0,067614886	0,839565028
8,00E-04	0,062923663	0,780206659
0,0012	0,063777507	0,791061279
0,0016	0,054744324	0,678659787

Tabla 26 – U0 IN – OUT P= 3500 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3499,935734	309,3064661
4,00E-04	3499,942349	282,9397046
8,00E-04	3499,950357	225,6270218
0,0012	3499,949534	238,8551642
0,0016	3499,962738	161,872611

Tabla 25 – P IN – OUT P=3500 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2,221614482201E-05	2,254812908758E-05
4,00E-04	2,103512324146E-05	2,139851246531E-05
8,00E-04	1,957567453165E-05	1,988560904860E-05
0,0012	1,984130729254E-05	2,016226746015E-05
0,0016	1,703106620977E-05	1,729742119762E-05

Tabla 24 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3500 Pa (Fuente: propia)

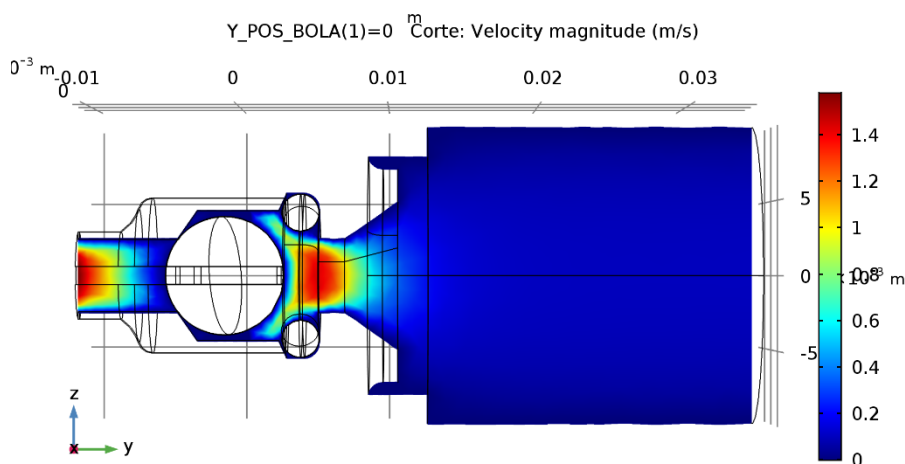


Ilustración 85 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3500 Pa (Fuente: propia)

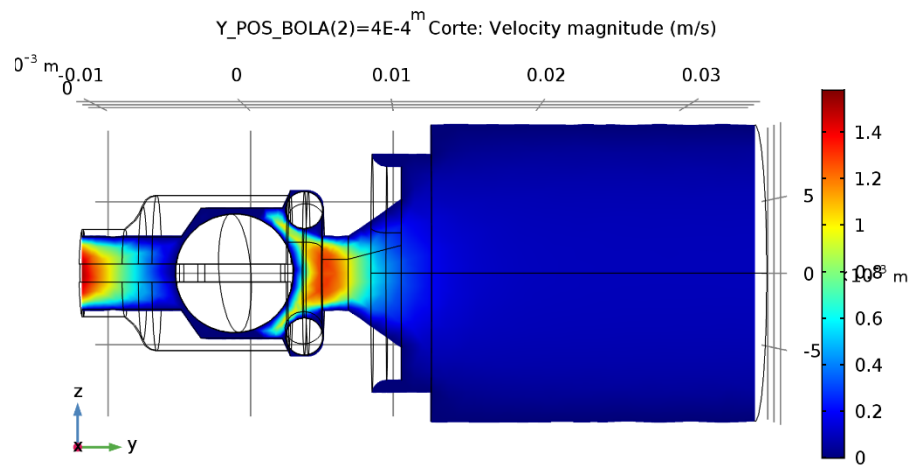


Ilustración 88 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)

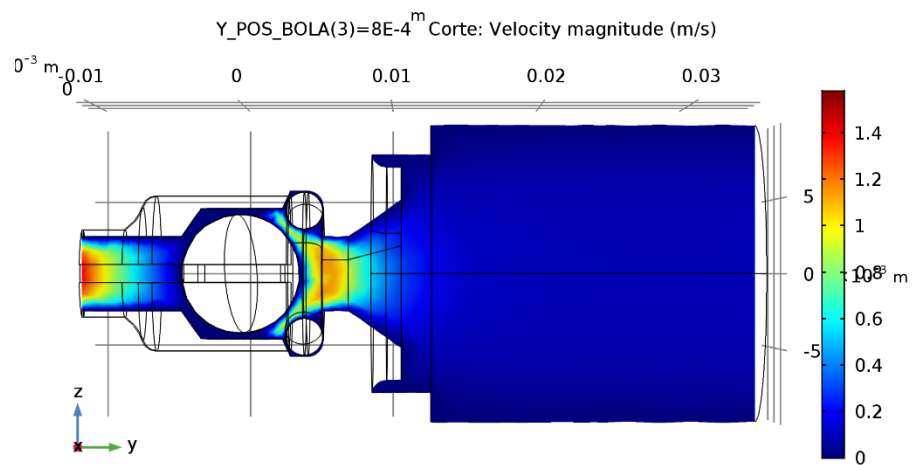


Ilustración 87 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)

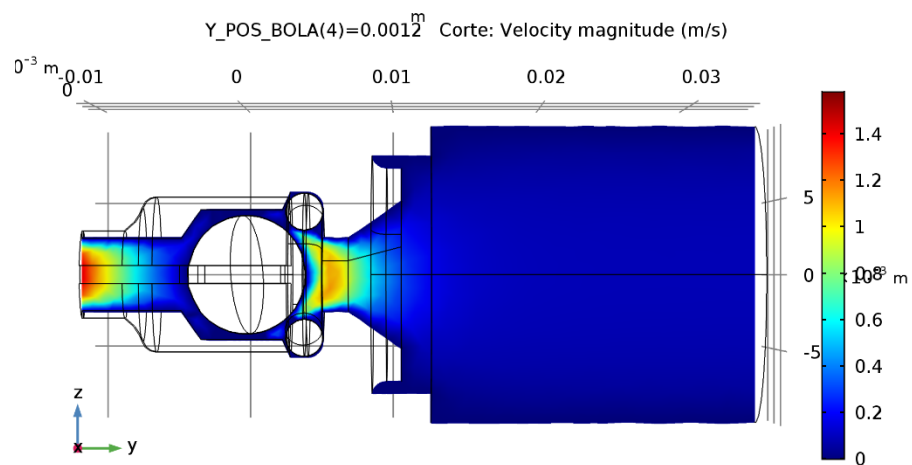
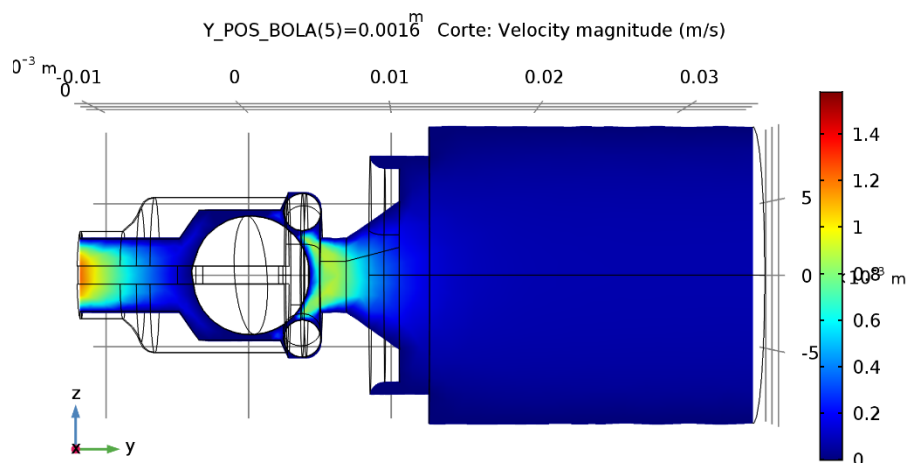
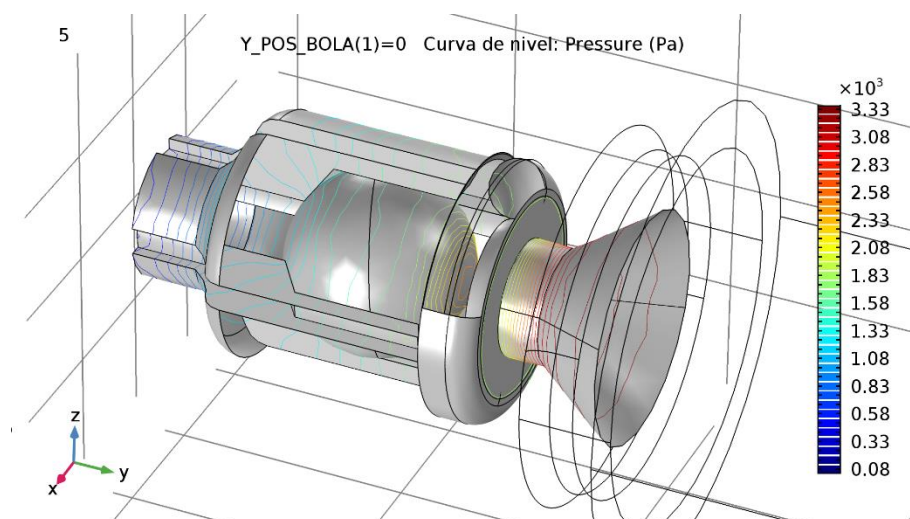


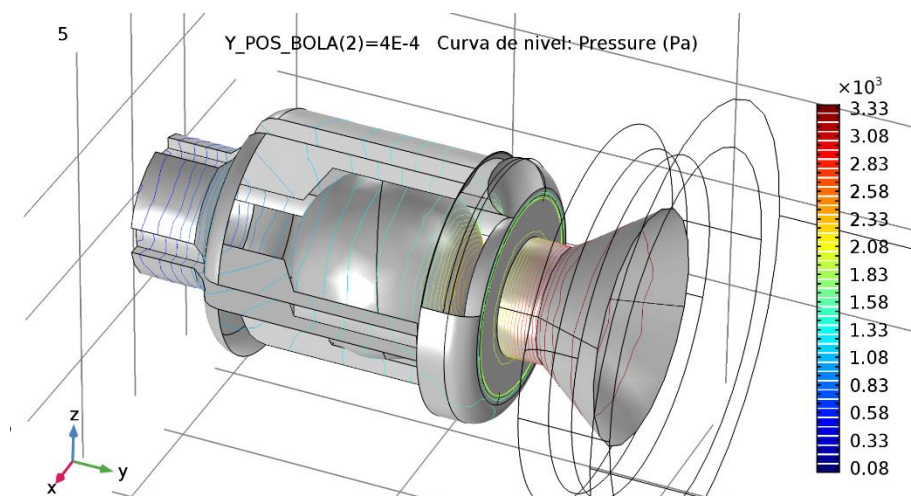
Ilustración 86- Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3500 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 91 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3500 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 89 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3500 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 90 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)

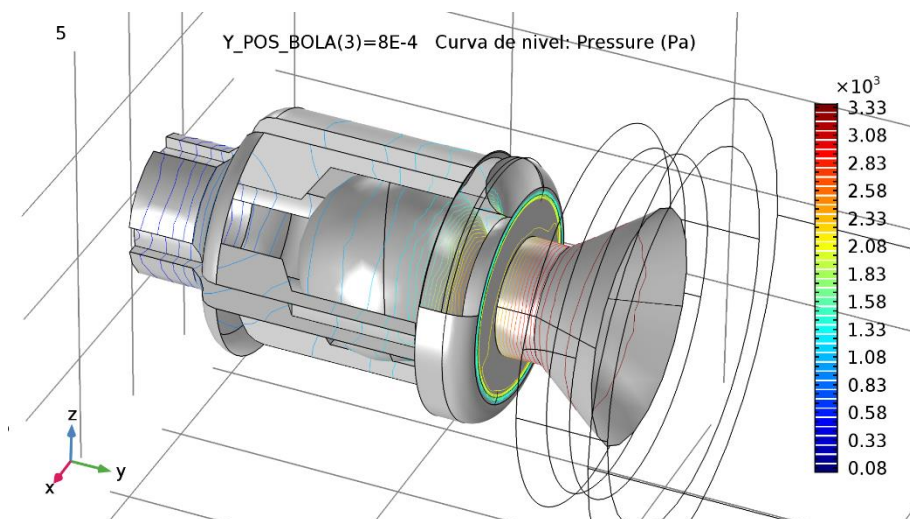


Ilustración 94 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)

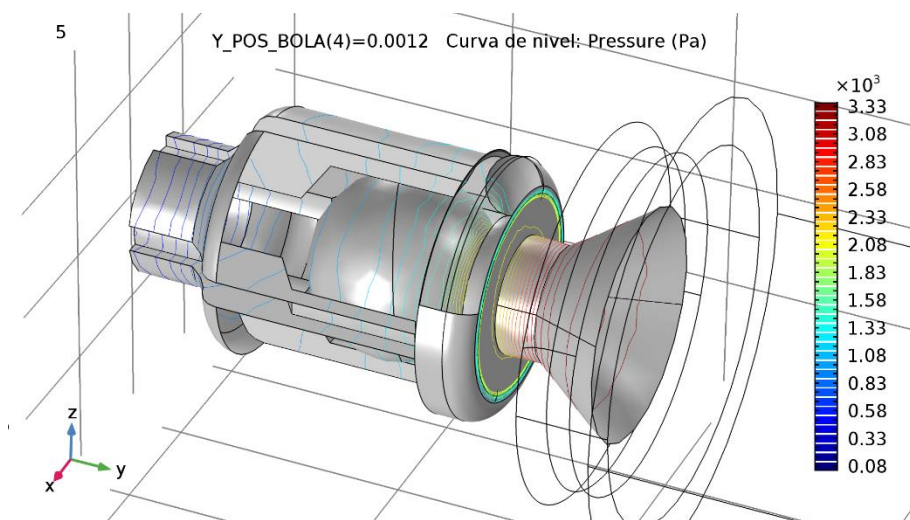


Ilustración 93 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3500 Pa (Fuente: propia)

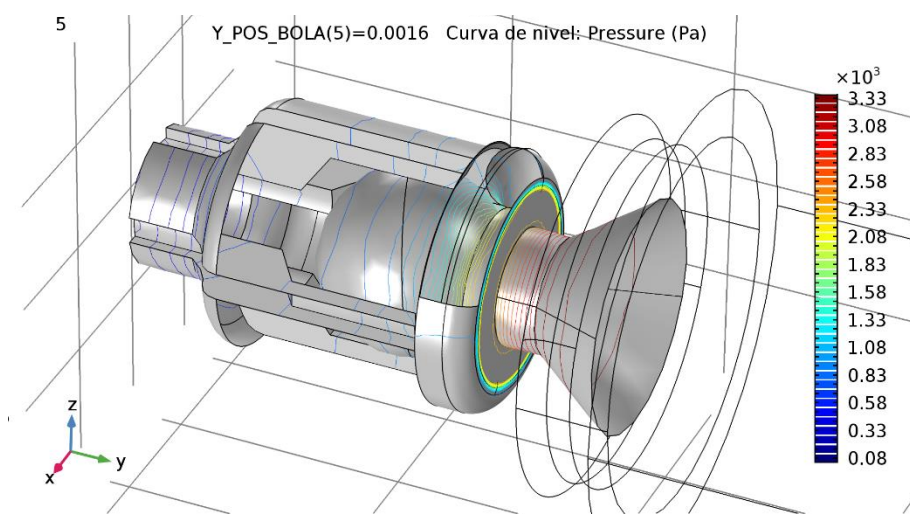
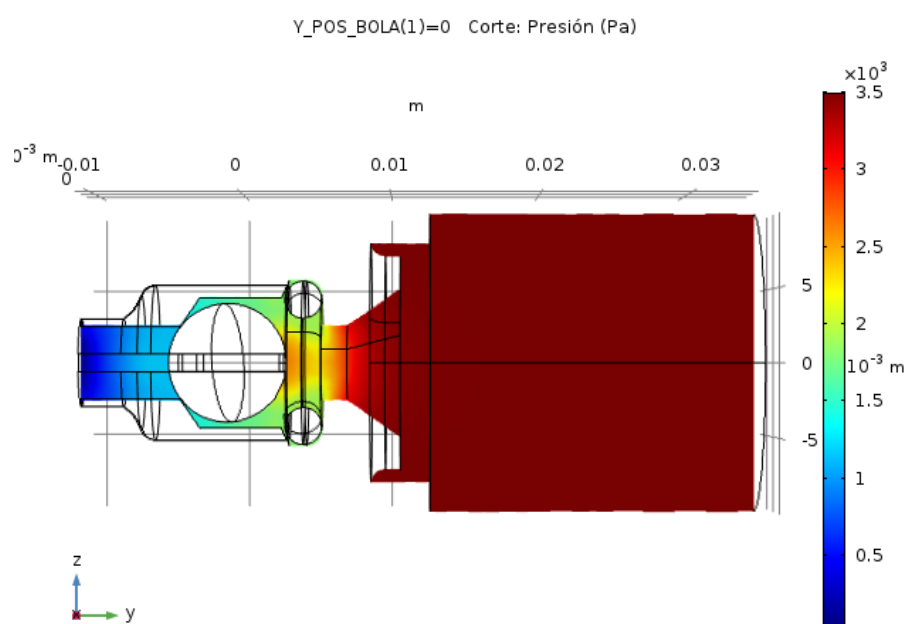
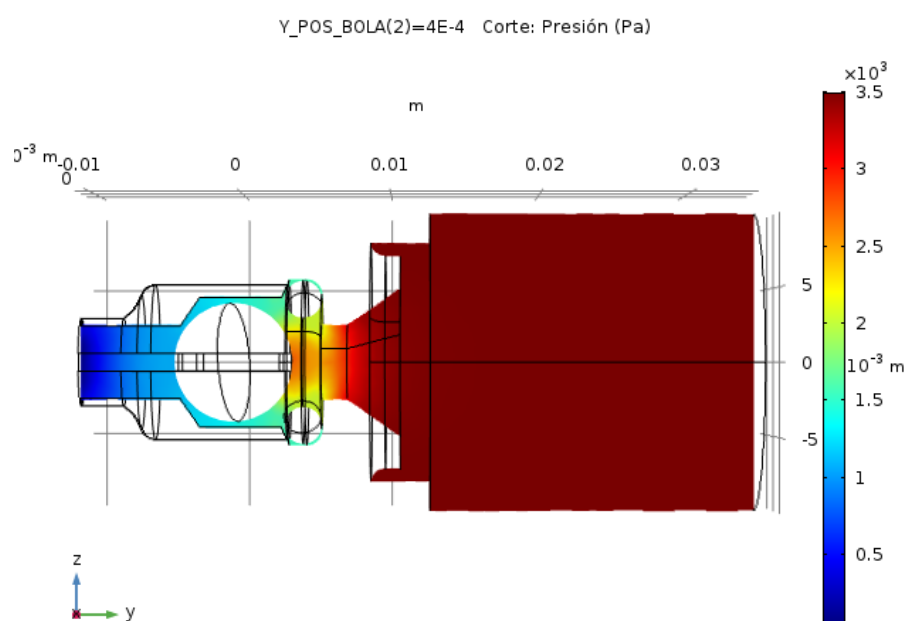


Ilustración 92 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3500 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 96 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3500 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 95 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)

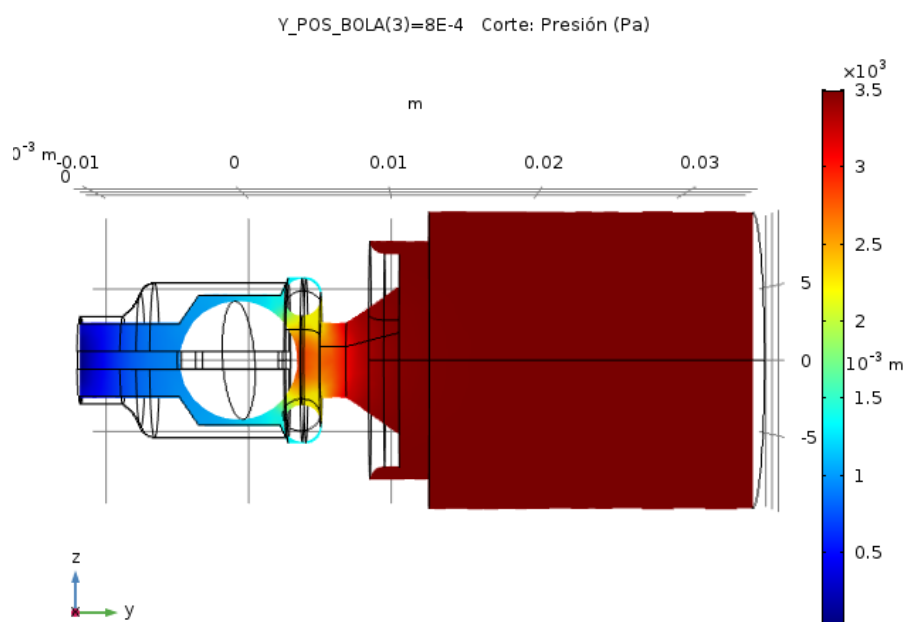


Ilustración 98 – P YZ Y_POS_BOLA= 8E-4 P=3500 Pa (Fuente: propia)

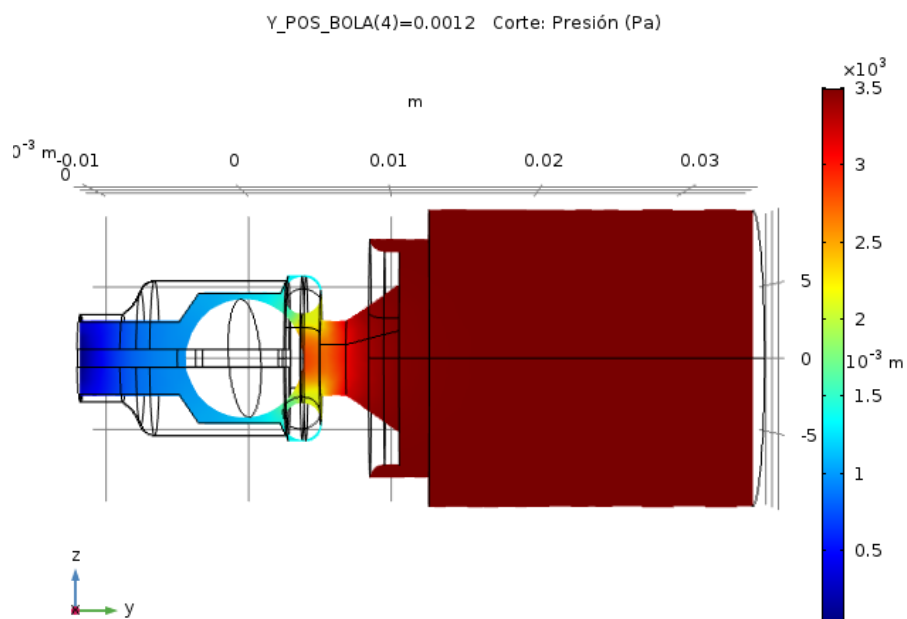
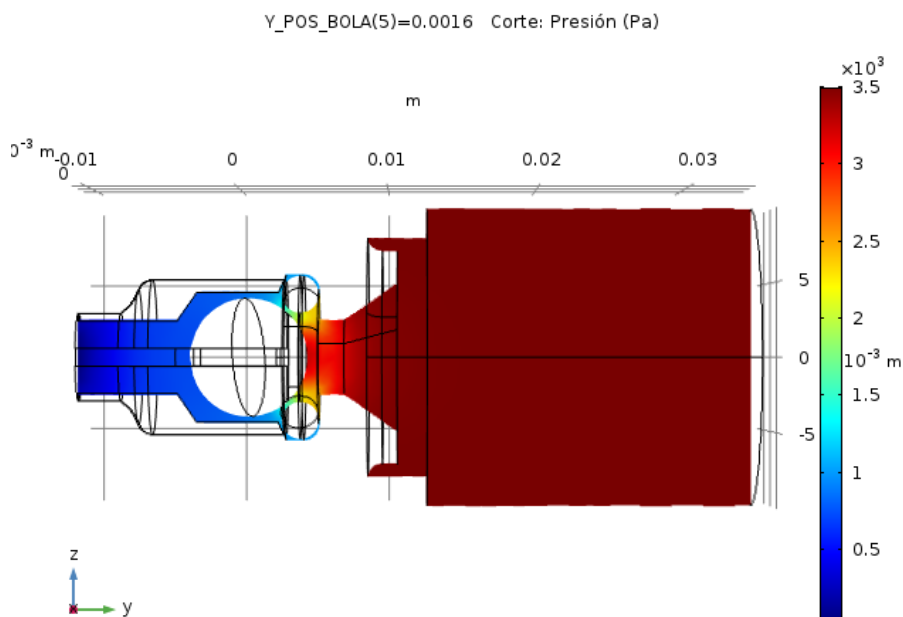


Ilustración 97 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3500 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 99 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3500 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 3625 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,072697772	0,900732357
4,00E-04	0,068836585	0,854875562
8,00E-04	0,064069097	0,794530538
0,0012	0,064982256	0,806128877
0,0016	0,055857201	0,692571143

Tabla 27 – U0 IN – OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)

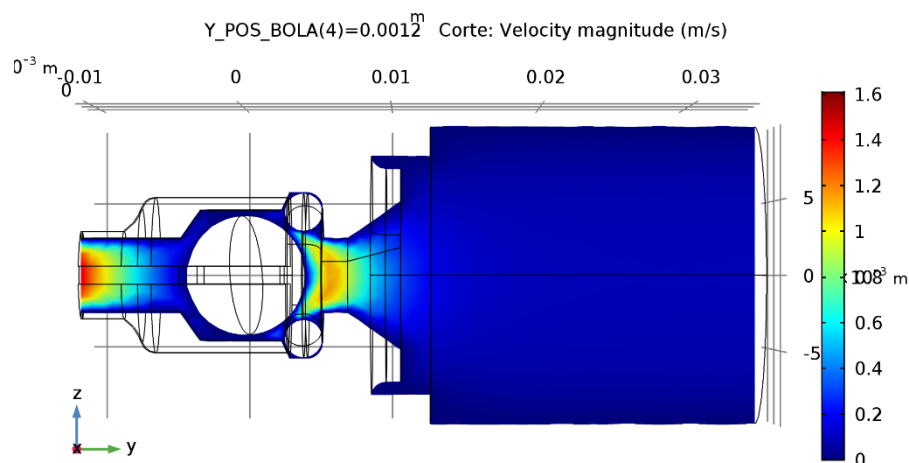
Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3624,933377	322,8089753
4,00E-04	3624,940228	295,3795171
8,00E-04	3624,948514	235,5116804
0,0012	3624,94759	249,6982403
0,0016	3624,961207	169,861271

Tabla 28 – P IN – OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)

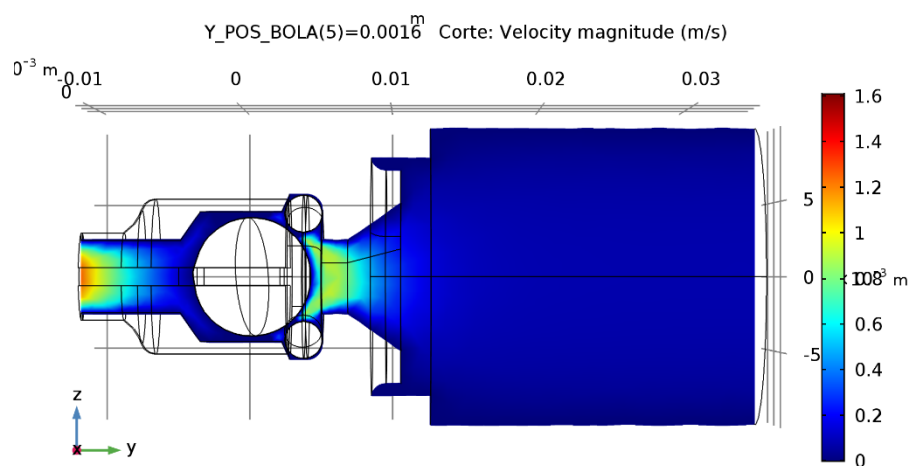
Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m^3/s)	Velocity magnitude (m^3/s)
0	2,2616418935E-05	2,2957521974E-05
4,00E-04	2,1415196248E-05	2,1788741497E-05
8,00E-04	1,9932021520E-05	2,0250690605E-05
0,0012	2,0216106947E-05	2,0546304625E-05
0,0016	1,7377284482E-05	1,7651988534E-05

Tabla 29 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)

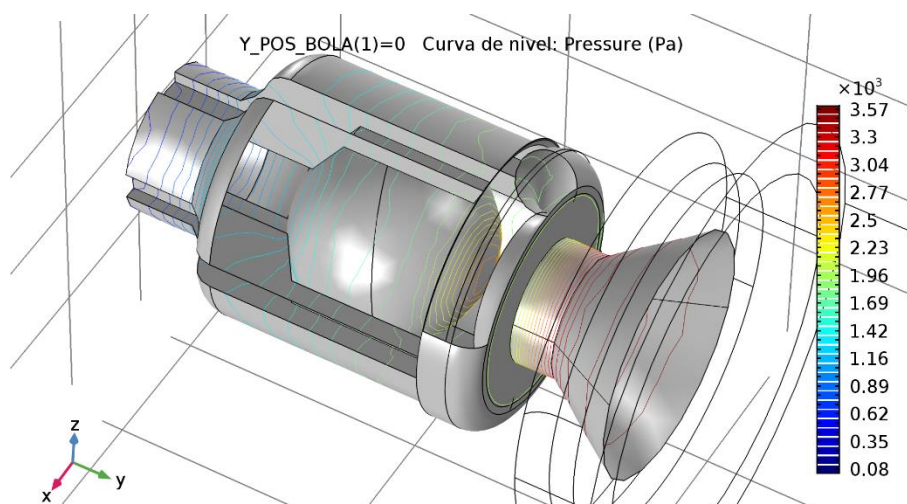




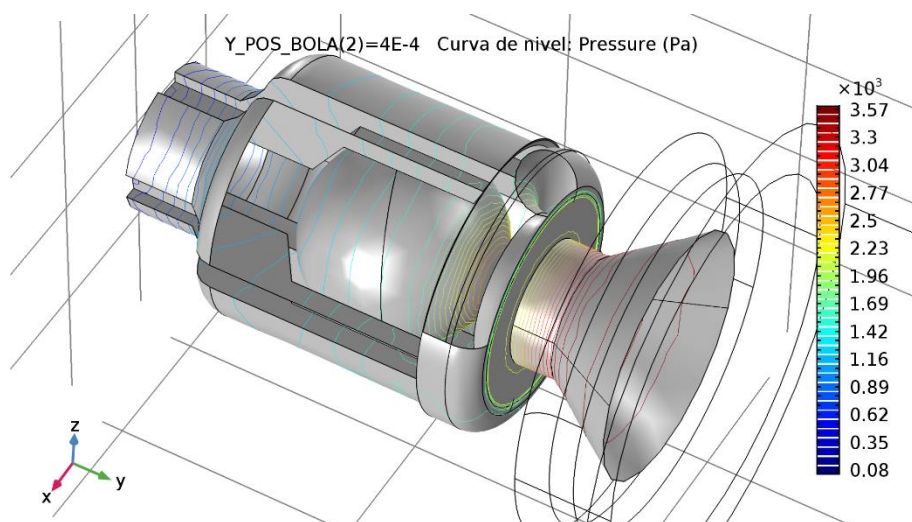
Il·lustració 105– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3625 Pa (Fuente: propia)



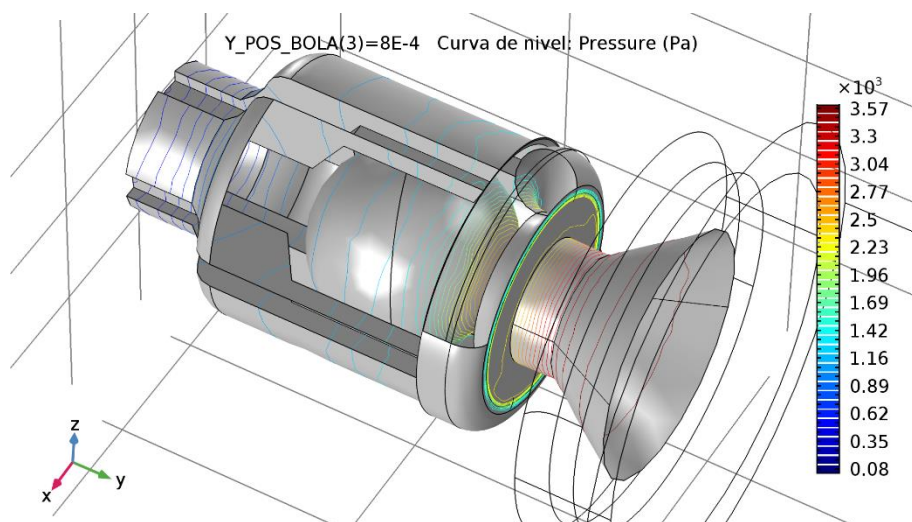
Il·lustració 103– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3625 Pa (Fuente: propia)



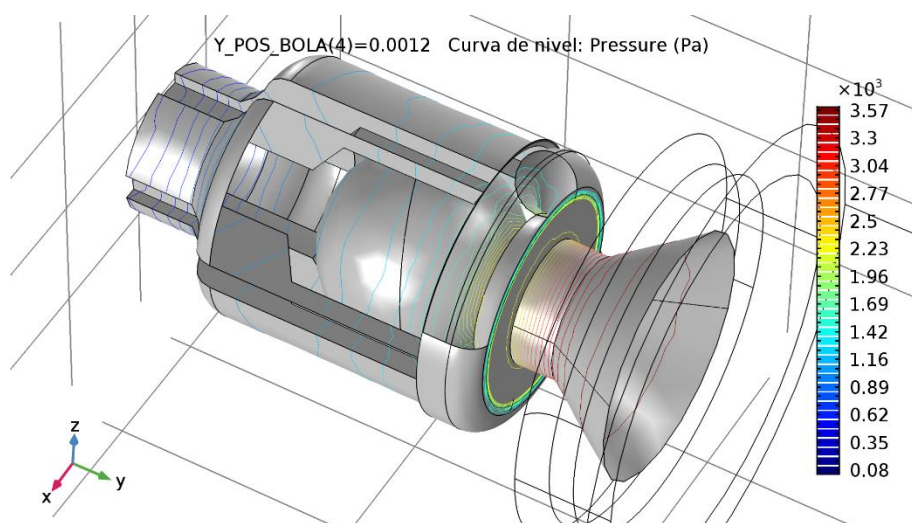
Il·lustració 104 – P Lineal Y_POS_BOLA=0 P=3625 Pa (Fuente: propia)



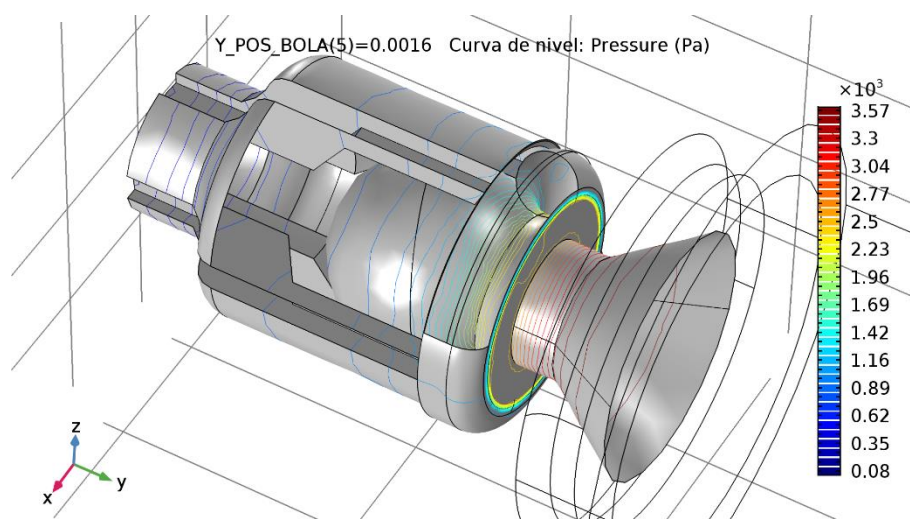
Il·lustració 108– P Lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)



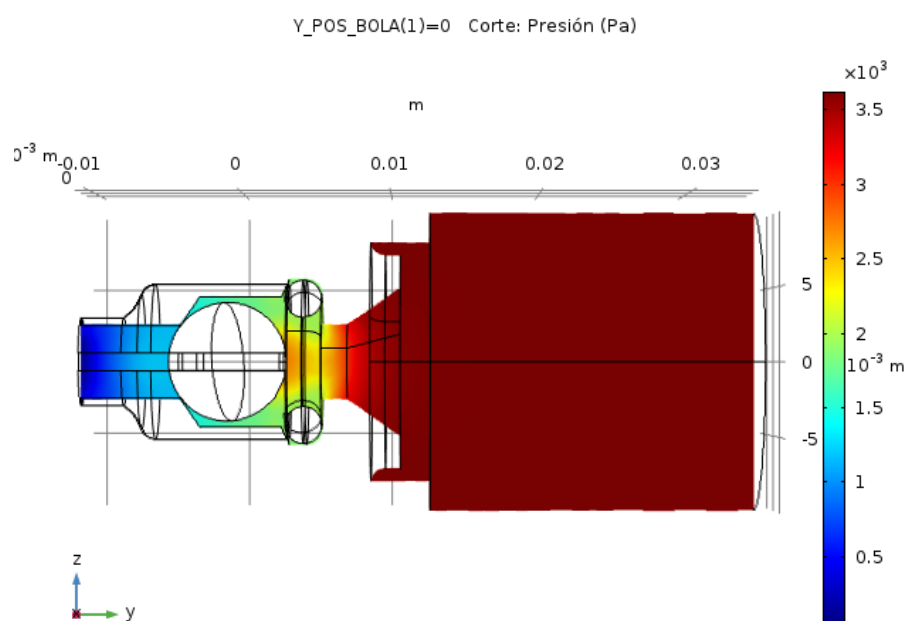
Il·lustració 107 – P Lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 106– P Lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3625 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 110 – P Lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3625 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 109 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3625 Pa (Fuente: propia)

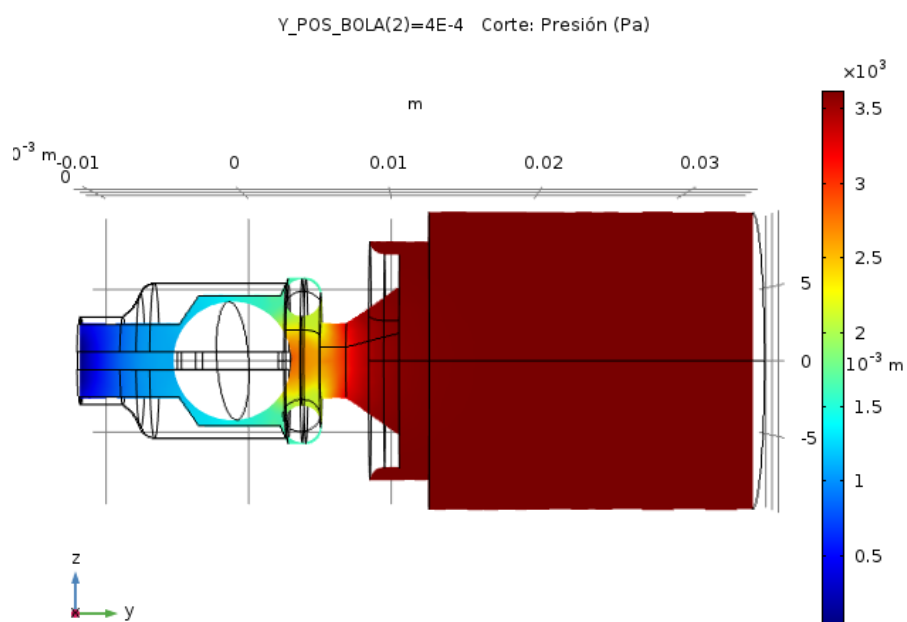


Ilustración 112– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)

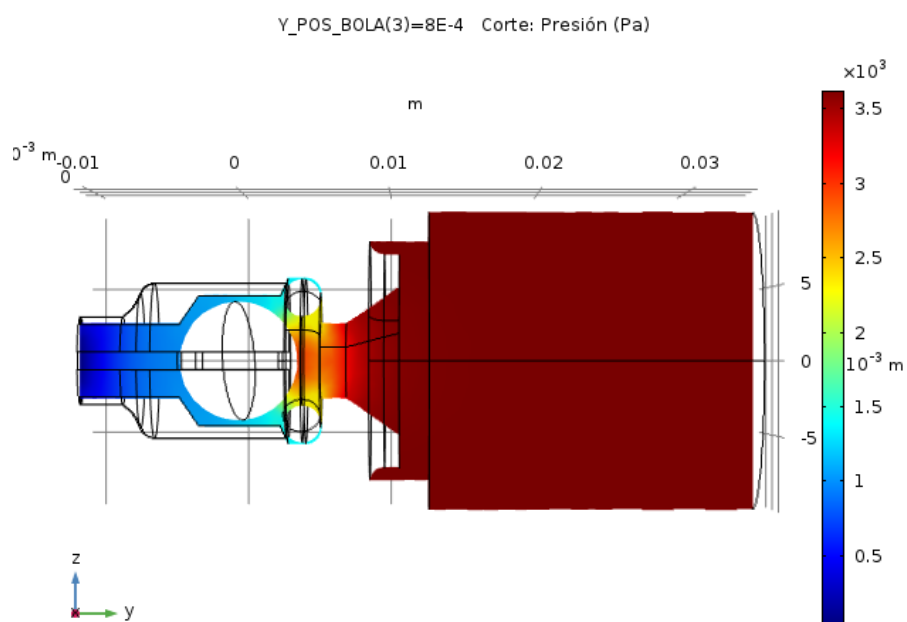
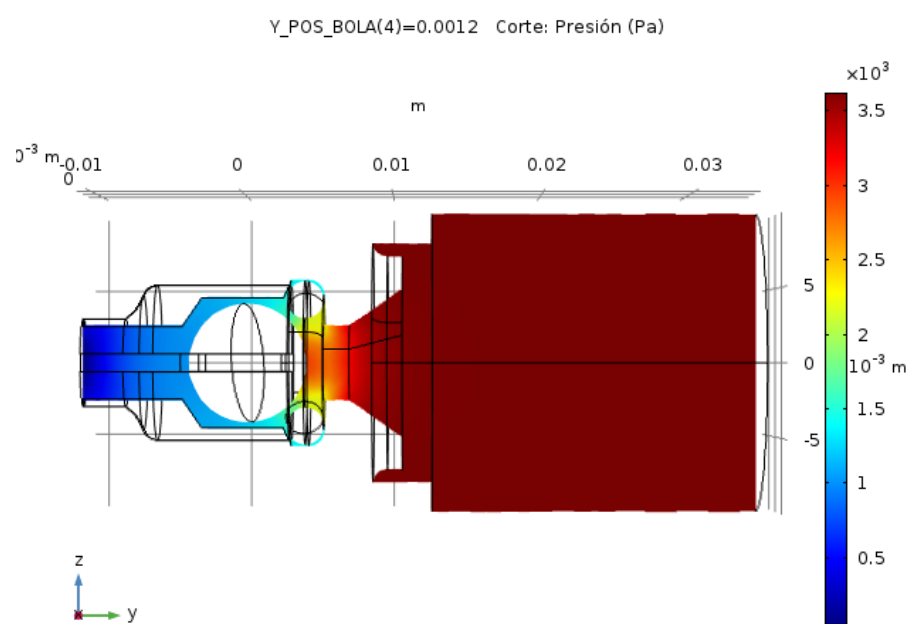
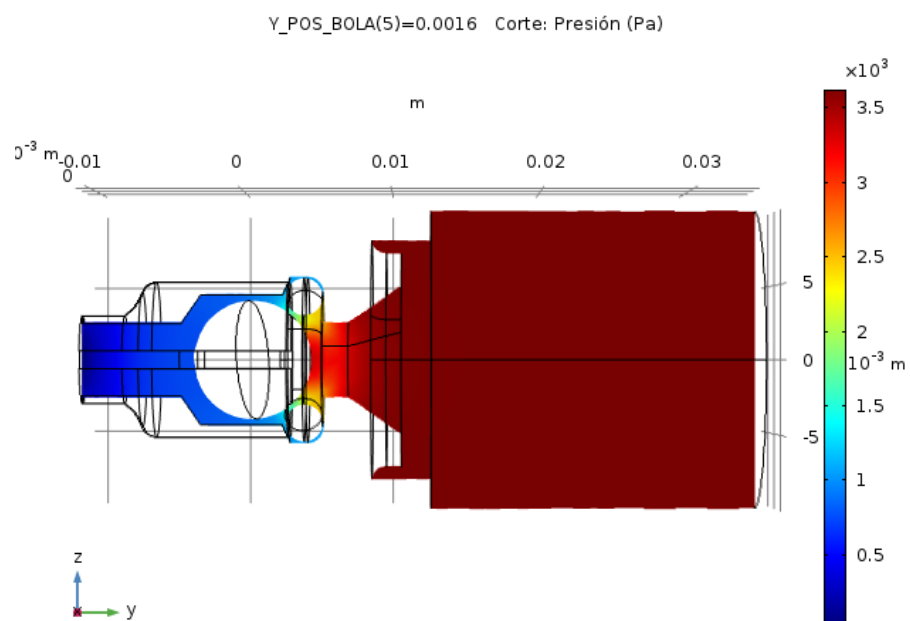


Ilustración 111– P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3625 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 114 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3625 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 113– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3625 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 3750 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,073962724	0,916526808
4,00E-04	0,070037575	0,869929738
8,00E-04	0,065194997	0,808613295
0,0012	0,066167157	0,820951075
0,0016	0,056951976	0,706258975

Tabla 32 – U0 IN – OUT P=3750 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3749,931015	336,400529
4,00E-04	3749,938106	307,9053045
8,00E-04	3749,94667	245,4683702
0,0012	3749,945642	260,635216
0,0016	3749,959666	177,9324625

Tabla 31 – P IN – OUT P=3750 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2.3009948174E-05	2.3360084894E-05
4.00E-04	2.1788826706E-05	2.2172436589E-05
8.00E-04	2.0282291152E-05	2.0609626537E-05
0.0012	2.0584731886E-05	2.0924087163E-05
0.0016	1.7717871076E-05	1.8000858766E-05

Tabla 30 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3750 Pa (Fuente: propia)

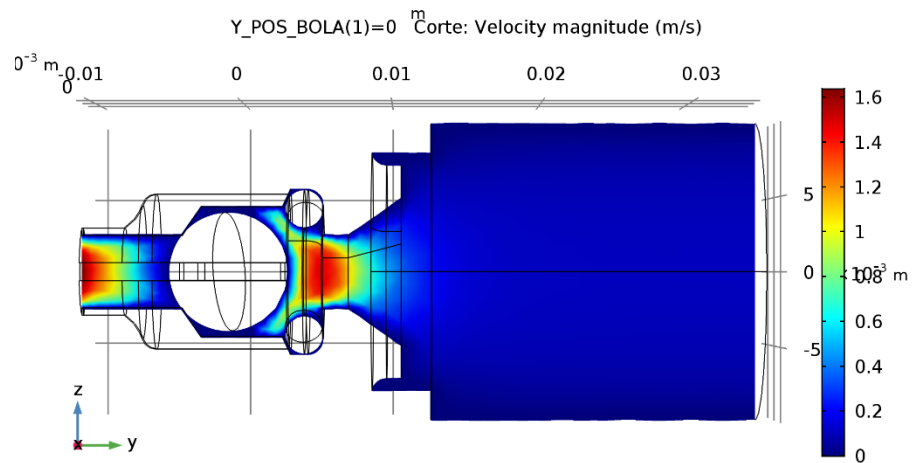
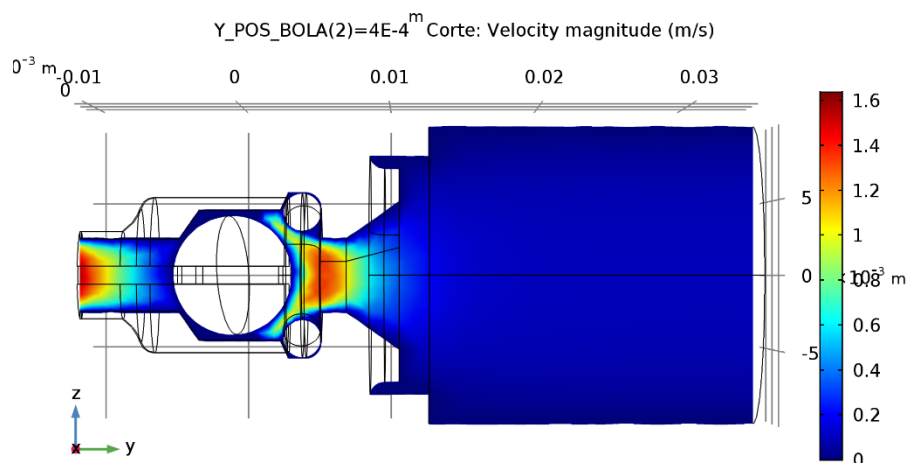
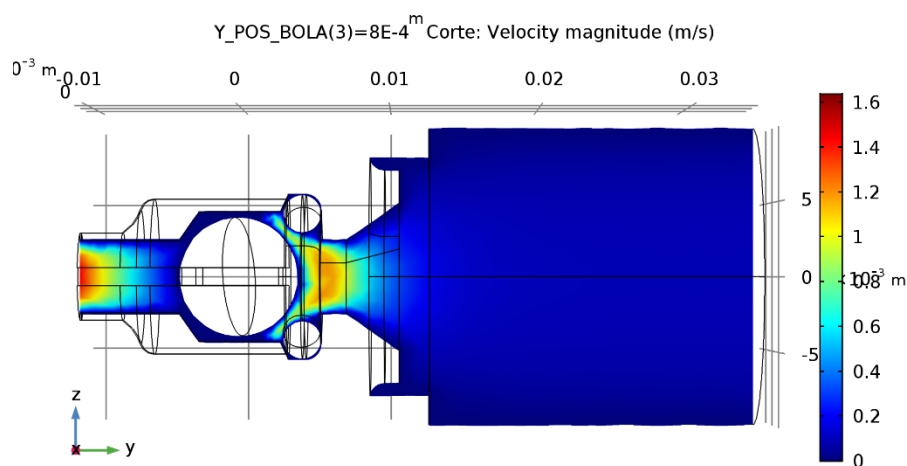


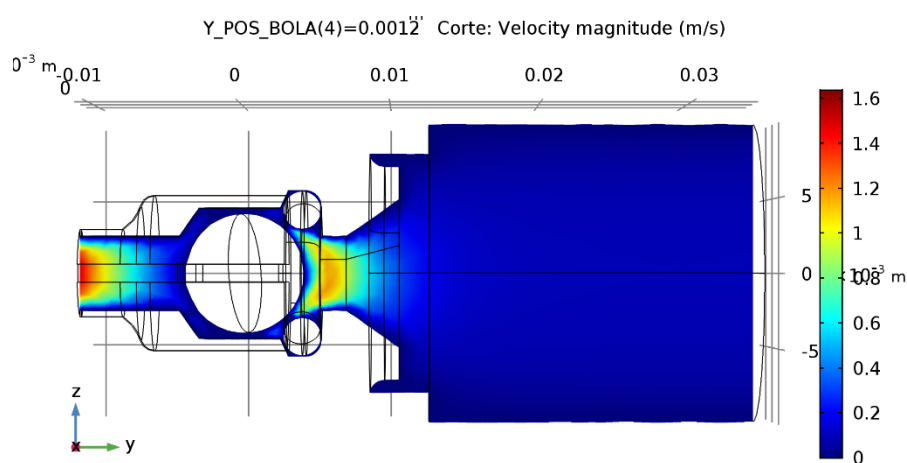
Ilustración 115 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 118– Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 117– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 116– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3750 Pa (Fuente: propia)

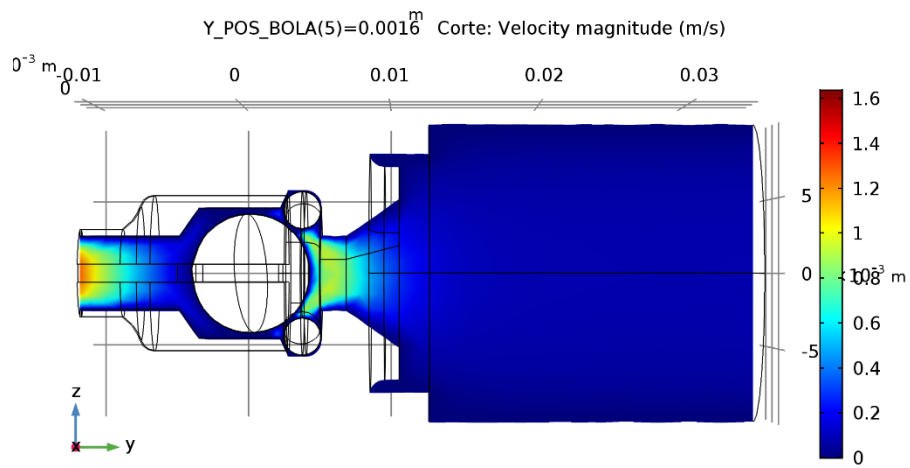


Ilustración 121 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3750 Pa (Fuente: propia)

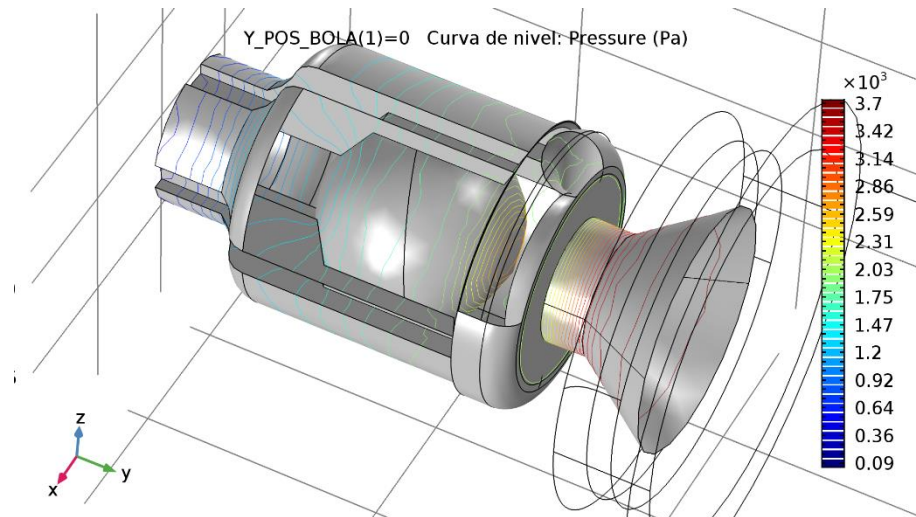


Ilustración 120 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3750 Pa (Fuente: propia)

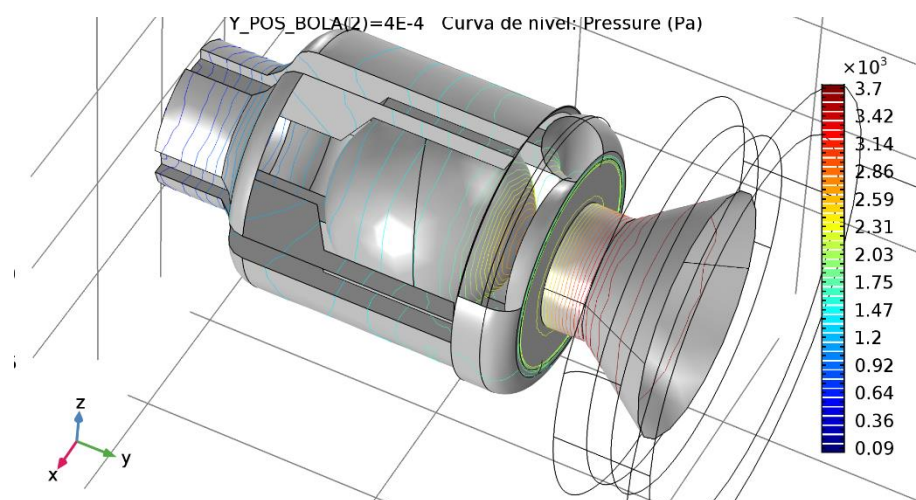
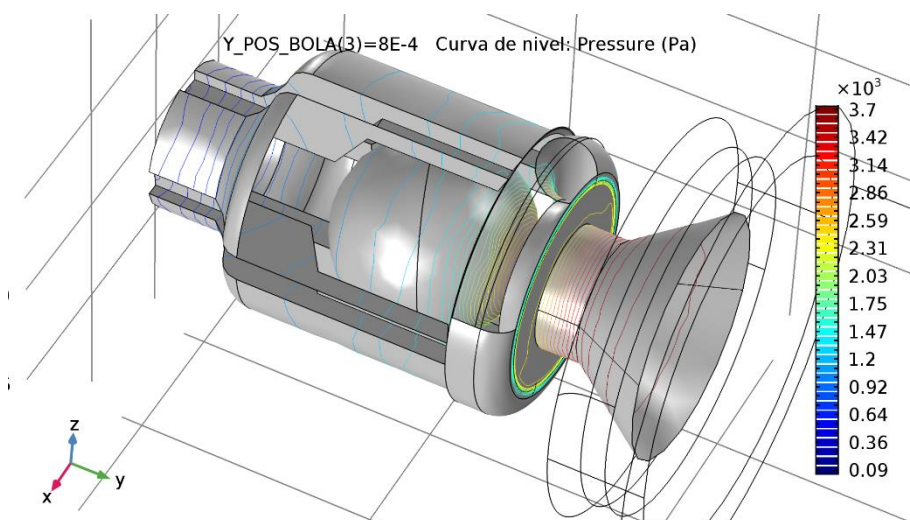
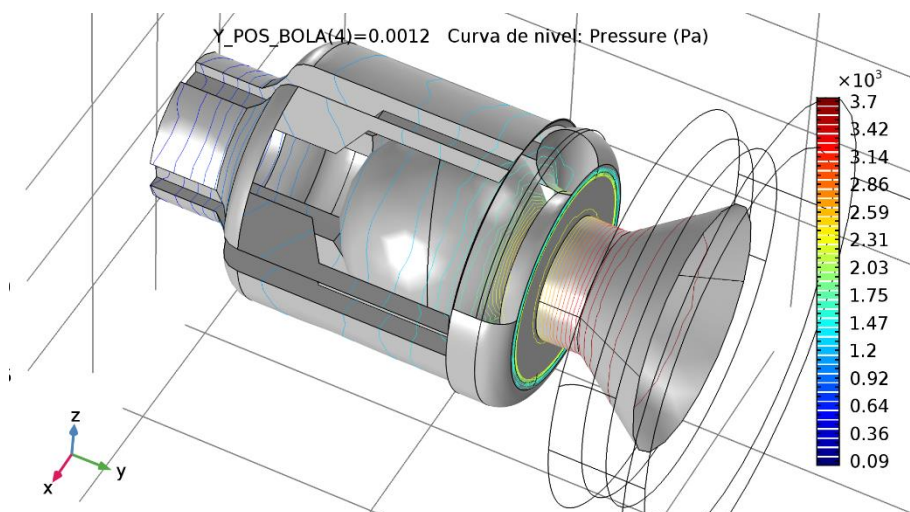


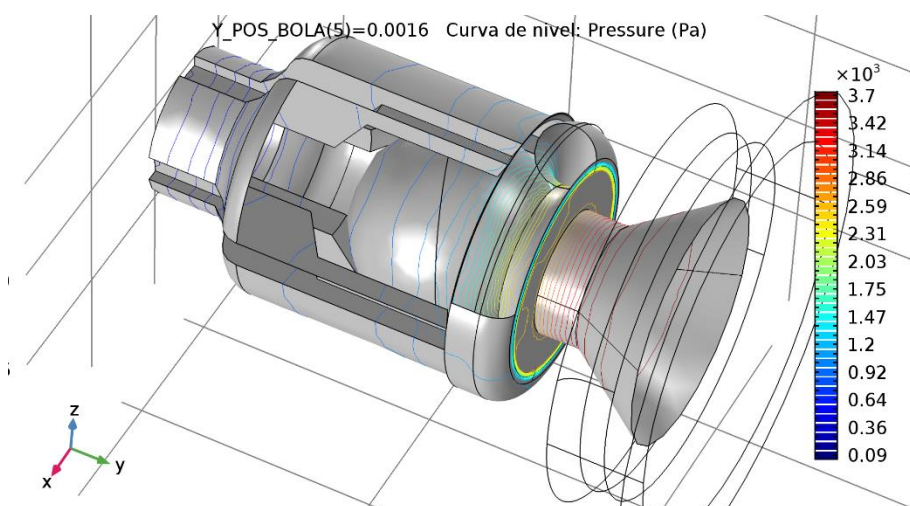
Ilustración 119 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 124 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 123 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 122 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3750 Pa (Fuente: propia)

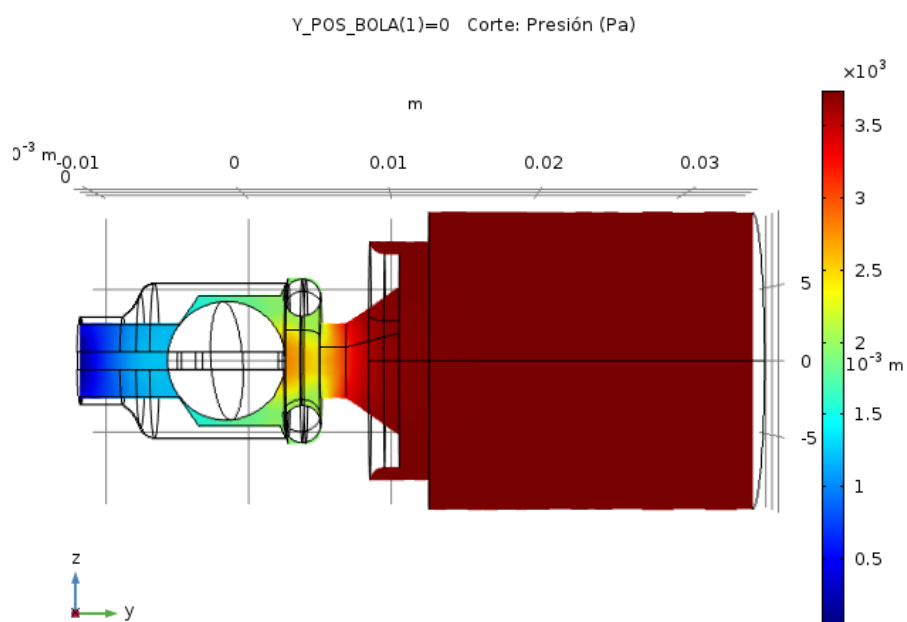


Ilustración 126 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3750 Pa (Fuente: propia)

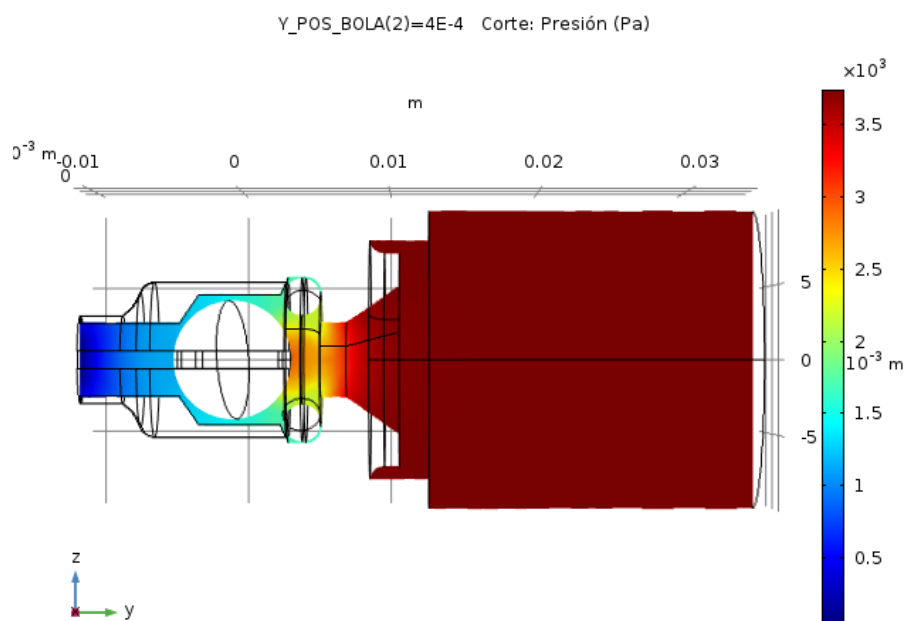
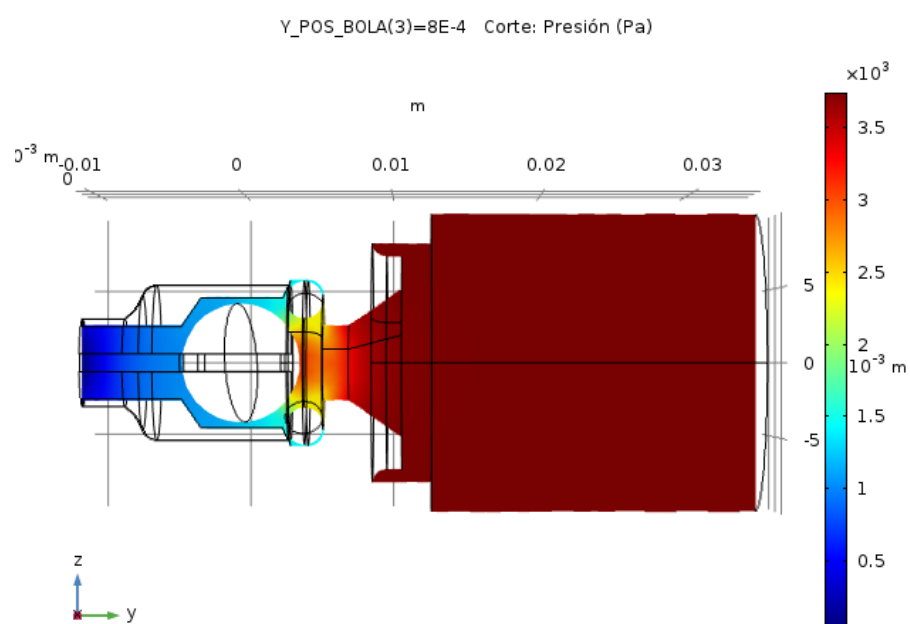
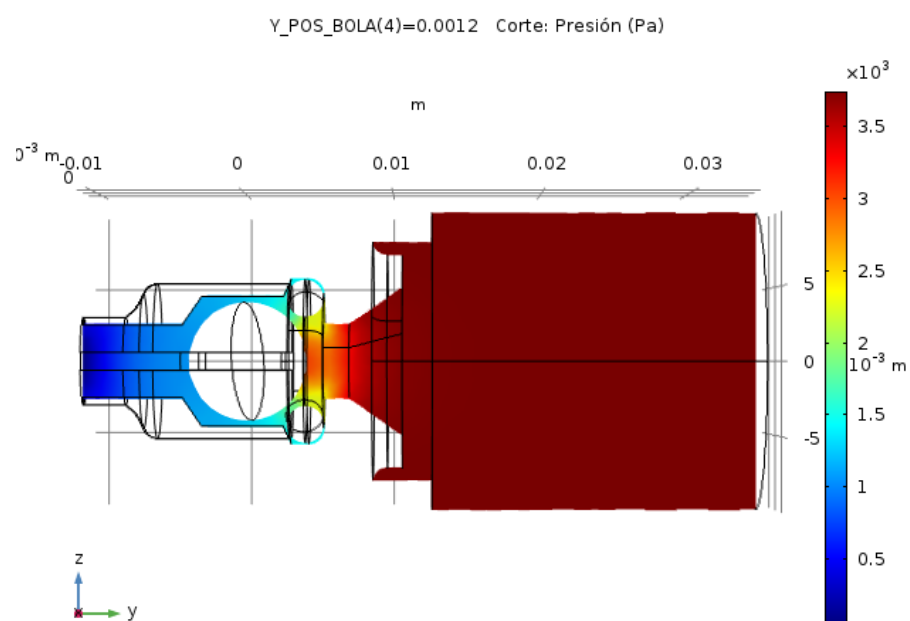


Ilustración 125– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 128 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3750 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 127 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3750 Pa (Fuente: propia)

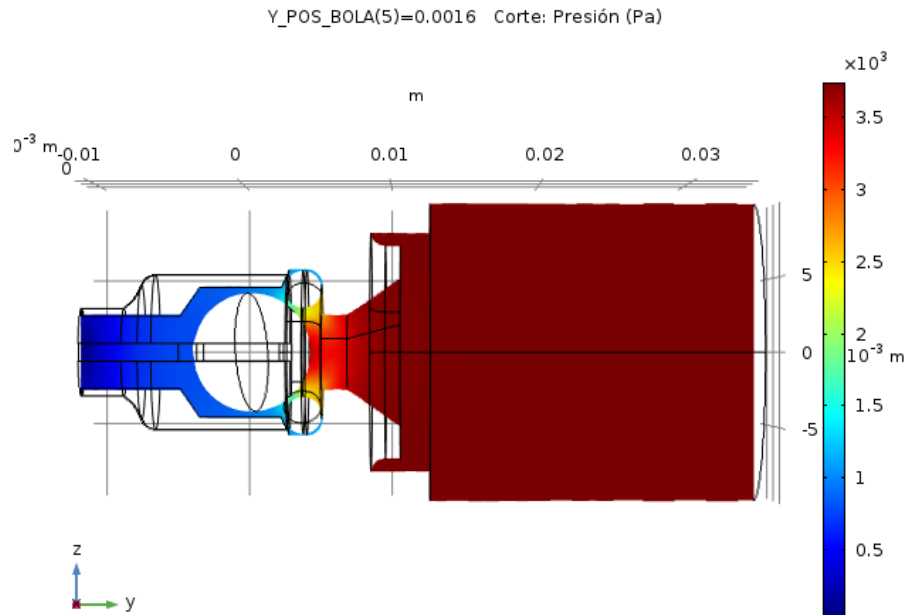


Ilustración 129 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3750 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 3875 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,075207008	0,932065938
4,00E-04	0,071218894	0,884740251
8,00E-04	0,06630359	0,822482085
0,0012	0,067332649	0,83553324
0,0016	0,058029411	0,719732809

Tabla 34 – U0 IN – OUT P=3875 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3874,928654	350,0806959
4,00E-04	3874,935979	320,512511
8,00E-04	3874,944808	255,5032632
0,0012	3874,943688	271,664101
0,0016	3874,958119	186,0885008

Tabla 33 – P IN – OUT P=3875 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2.339704717E-05	2.375614031E-05
4.00E-04	2.215633707E-05	2.254992129E-05
8.00E-04	2.062717656E-05	2.096310894E-05
0.0012	2.094731888E-05	2.129575180E-05
0.0016	1.805306317E-05	1.834427469E-05

Tabla 35 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=3875 Pa (Fuente: propia)

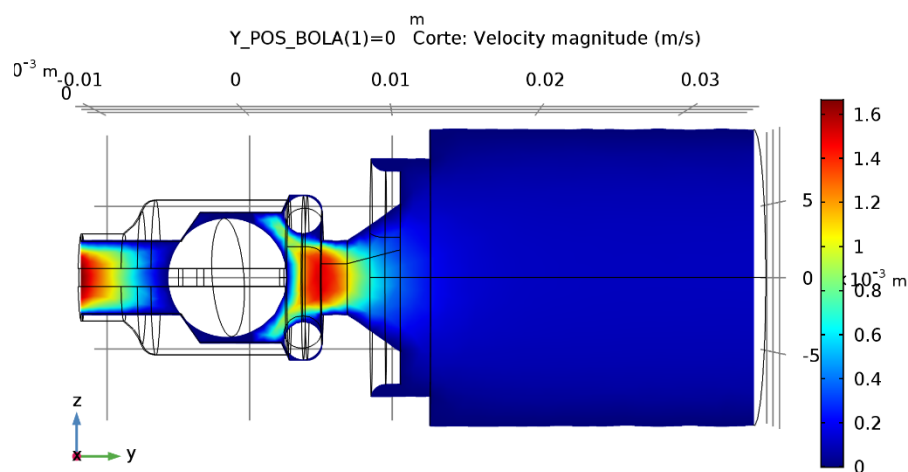


Ilustración 130 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=3875 Pa (Fuente: propia)

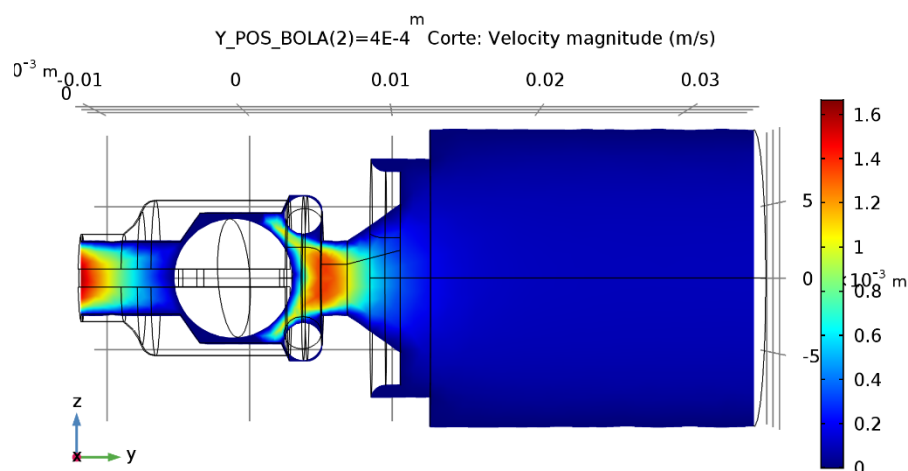


Ilustración 131 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)

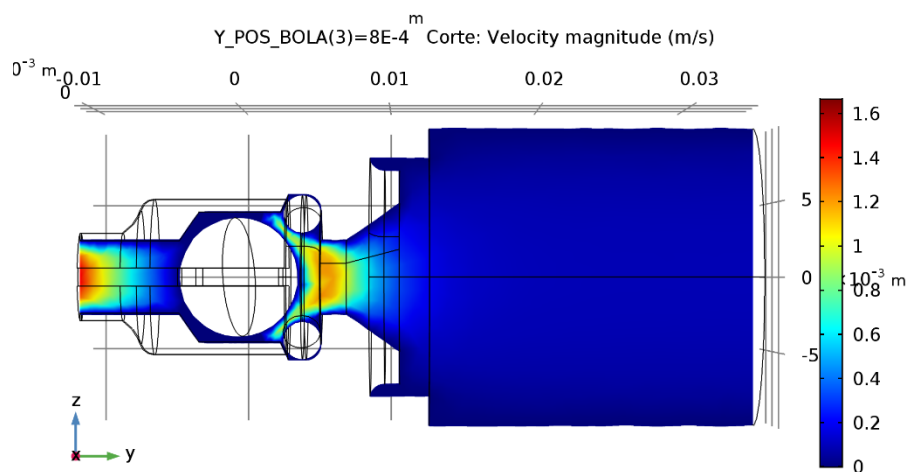


Ilustración 134– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)

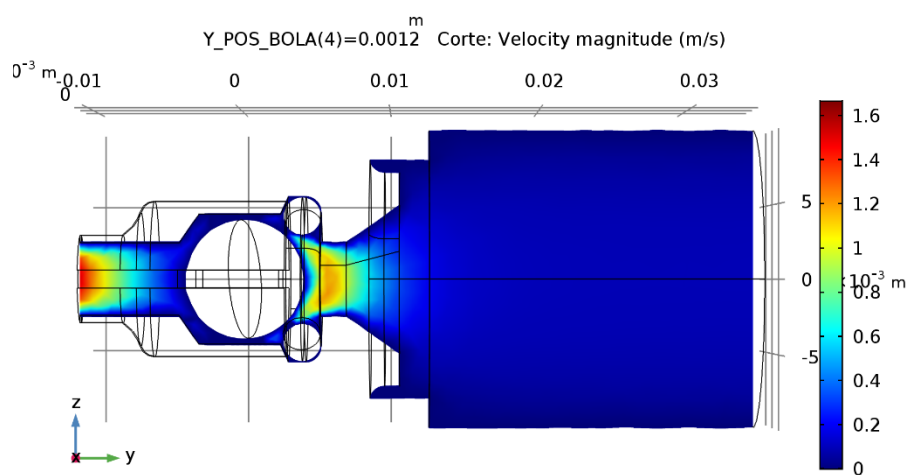


Ilustración 133 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=3875 Pa (Fuente: propia)

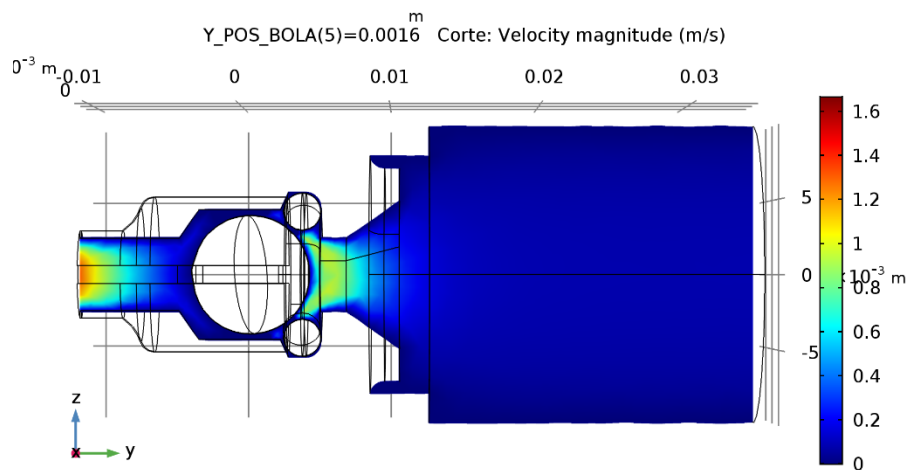
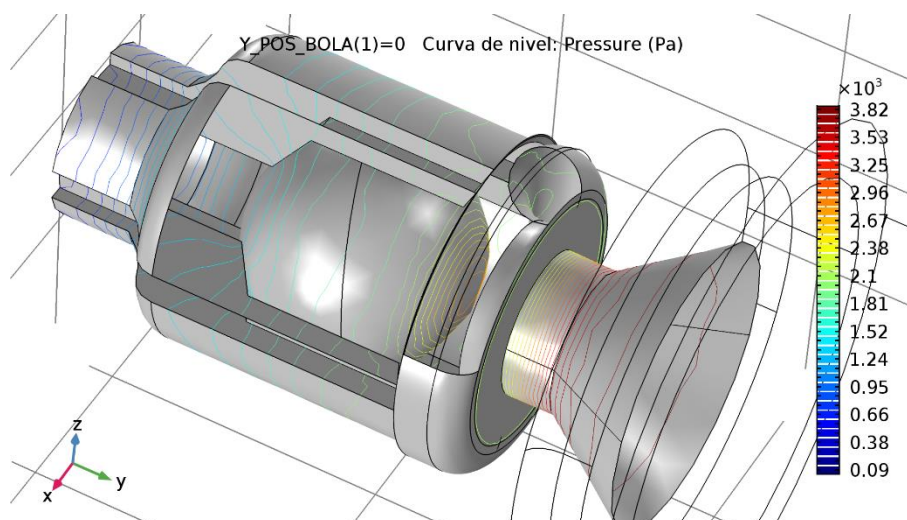
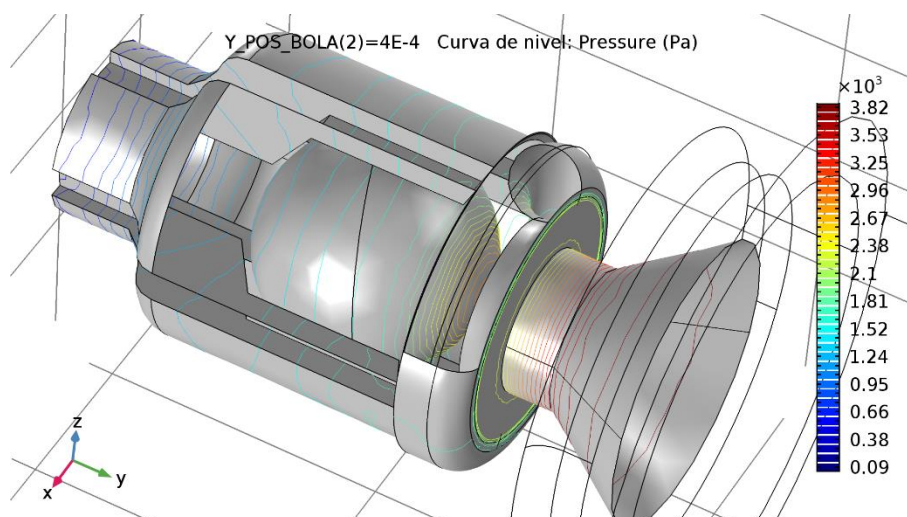


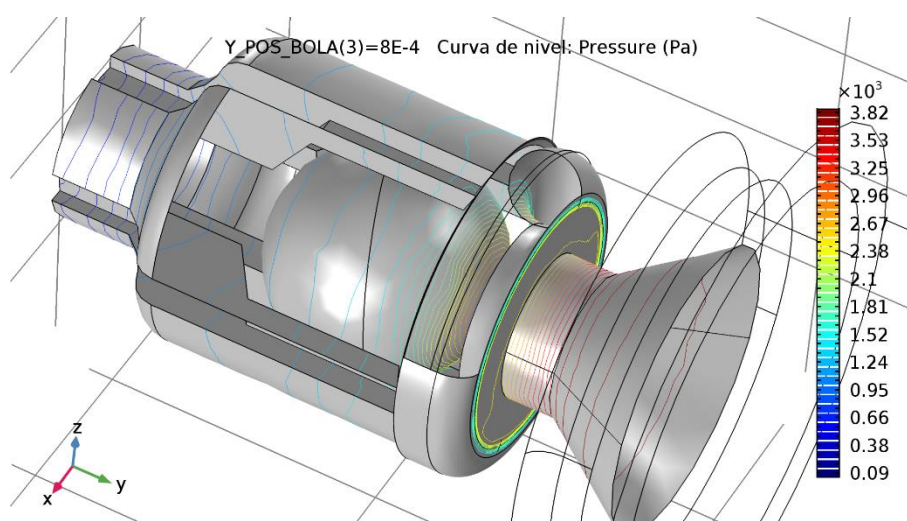
Ilustración 132– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=3875 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 137 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=3875 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 136 – P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 135 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)

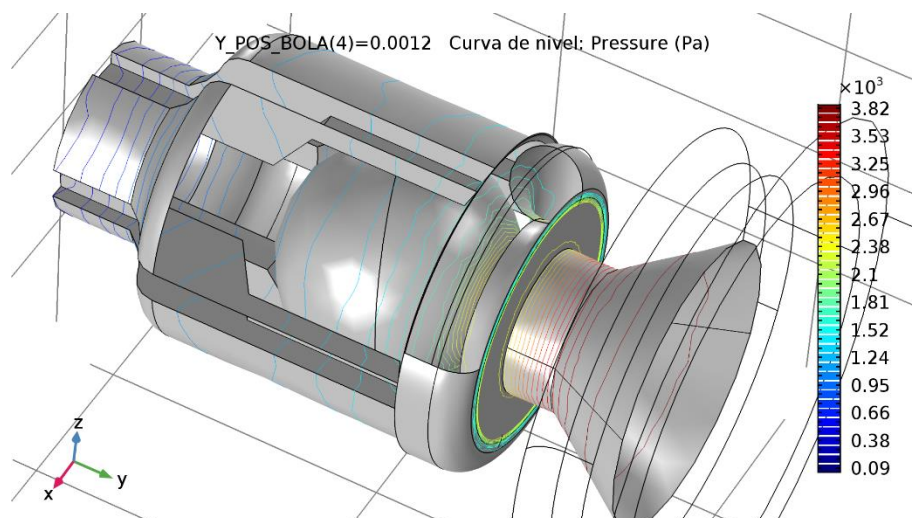


Ilustración 138– P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=3875 Pa (Fuente: propia)

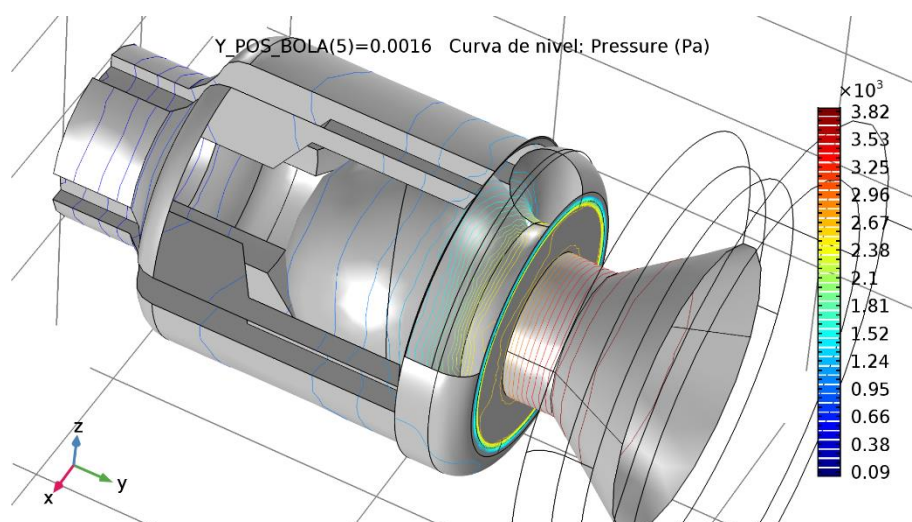
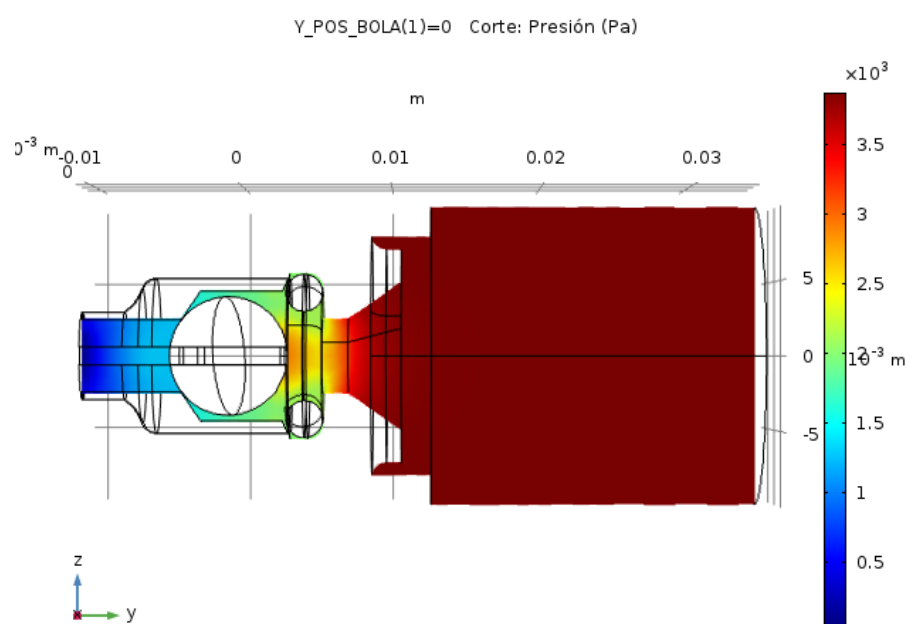
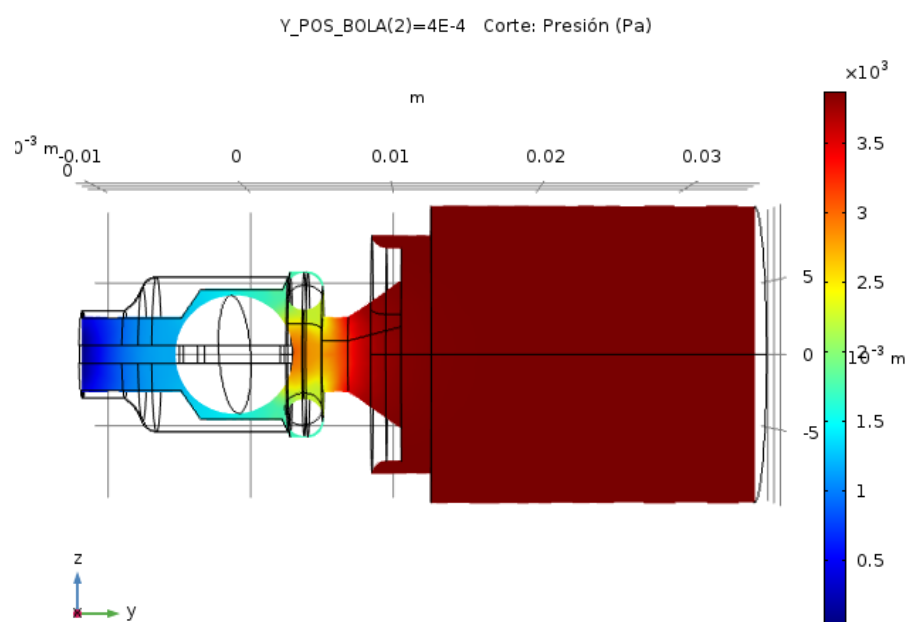


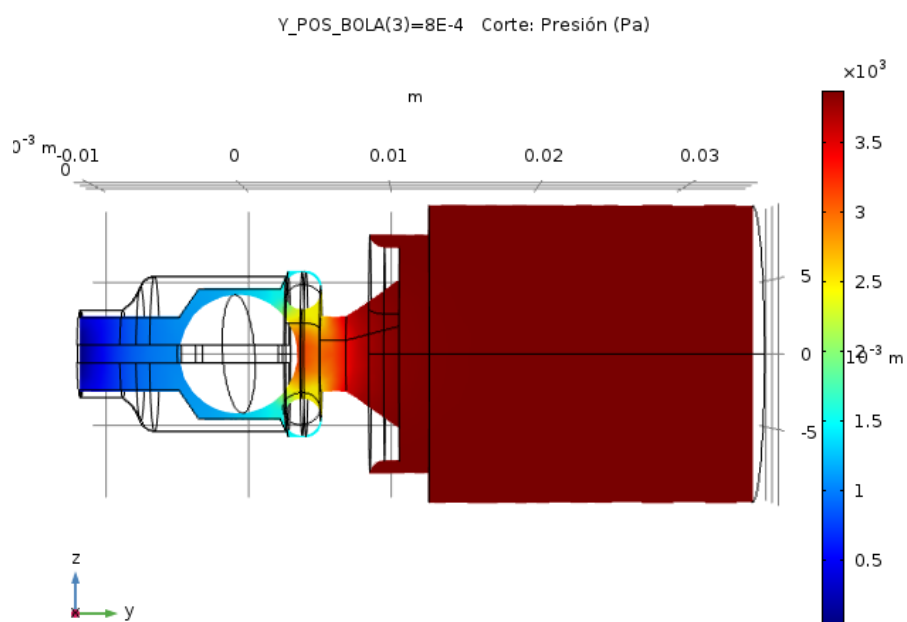
Ilustración 139 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=3875 Pa (Fuente: propia)



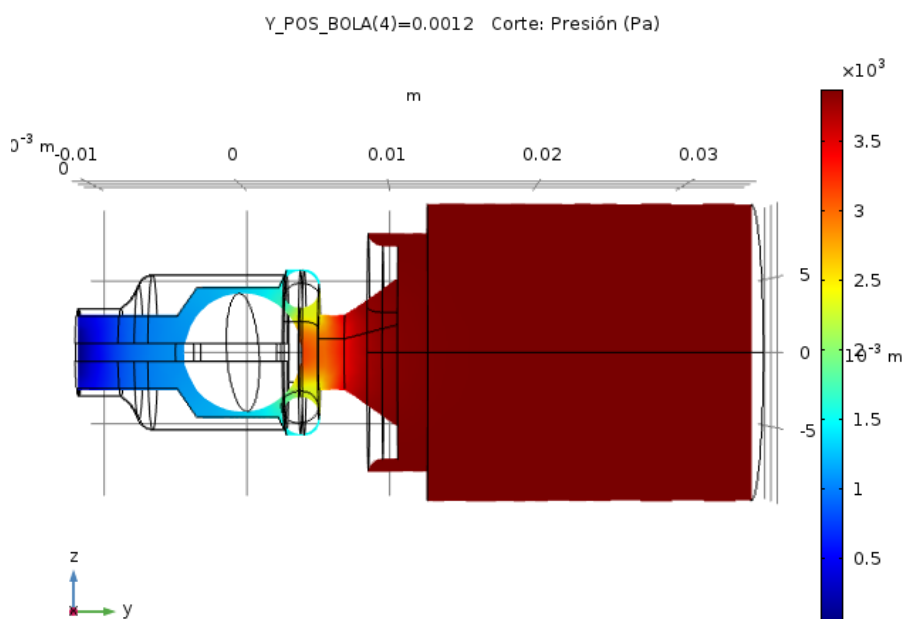
Il·lustració 141 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=3875 Pa (Fuente: propia)



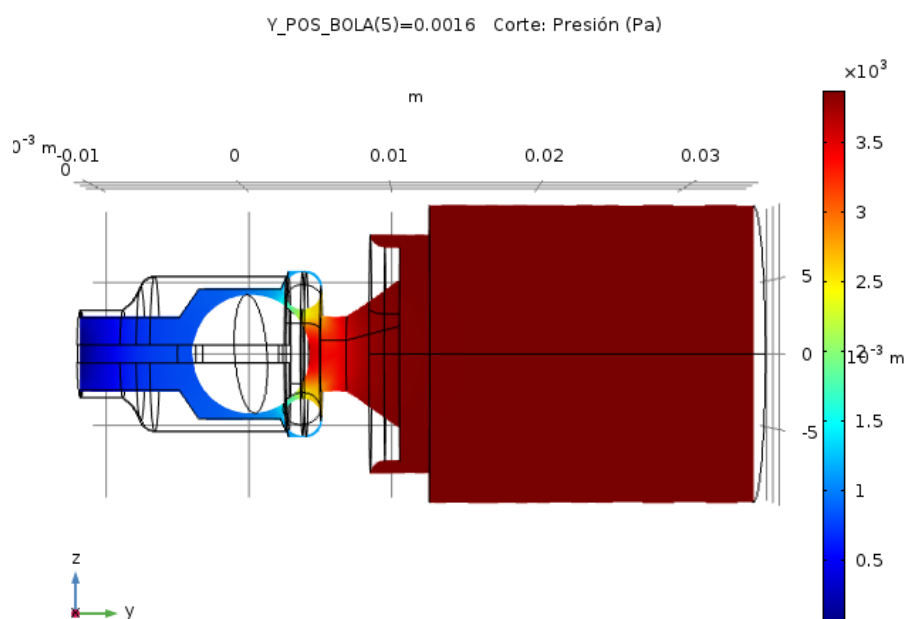
Il·lustració 140– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 143– P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=3875 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 142– P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=3875 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 144– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=3875 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 4000 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,076431417	0,947359716
4,00E-04	0,072381446	0,899318361
8,00E-04	0,067393436	0,836119117
0,0012	0,068479686	0,849887139
0,0016	0,059090414	0,733004292

Tabla 36 – UO IN – OUT P=4000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	3999,926292	363,8509471
4,00E-04	3999,933851	333,2000529
8,00E-04	3999,942957	265,5975463
0,0012	3999,941728	282,782739
0,0016	3999,956561	194,3165483

Tabla 37 – P IN – OUT P=4000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2.377796345E-05	2.414594226E-05
4.00E-04	2.251800952E-05	2.292148257E-05
8.00E-04	2.096622964E-05	2.131068442E-05
0.0012	2.130416439E-05	2.166159850E-05
0.0016	1.838314345E-05	1.868253318E-05

Tabla 38 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=4000 Pa (Fuente: propia)

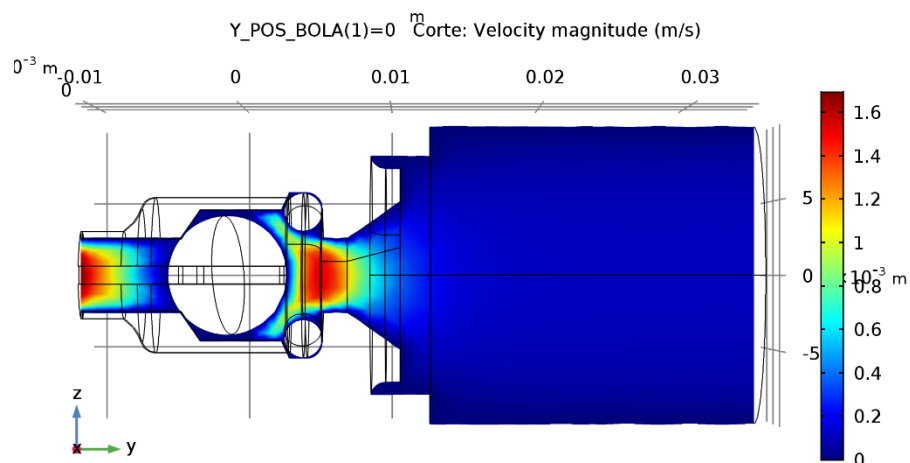


Ilustración 147 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=4000 Pa (Fuente: propia)

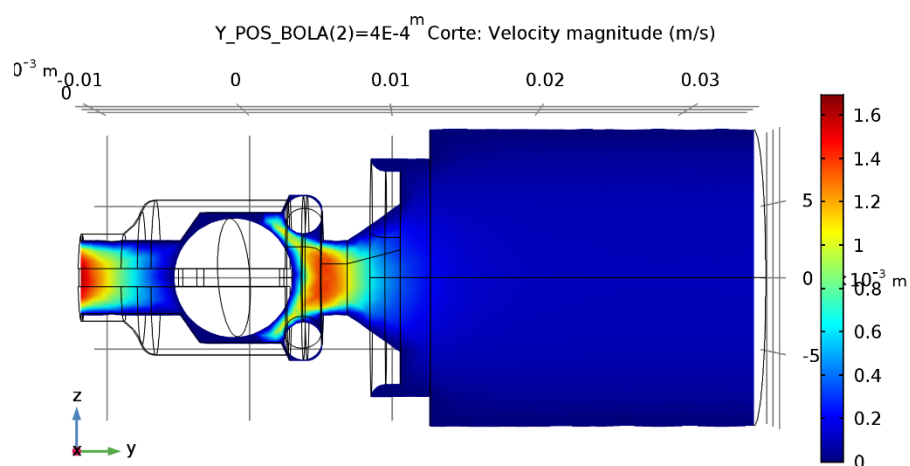


Ilustración 146 – Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)

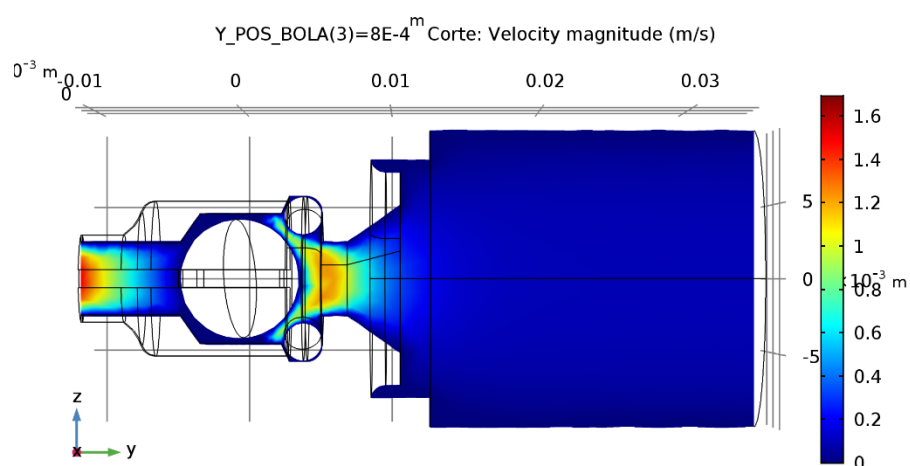
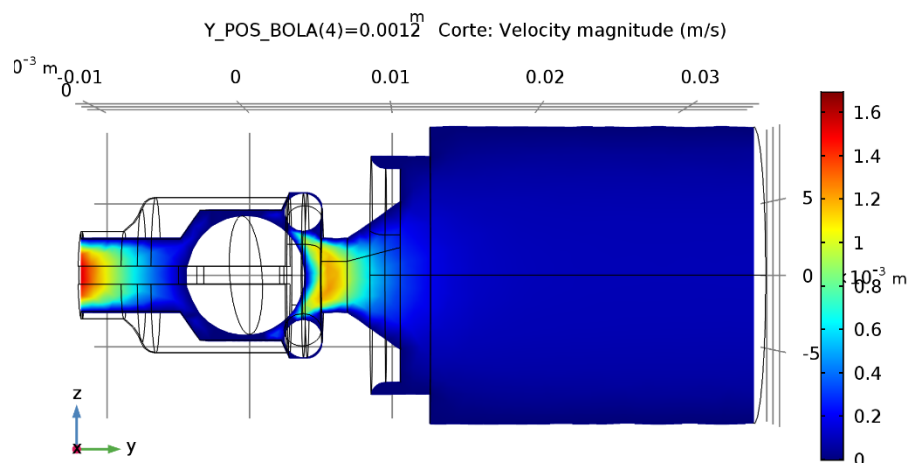
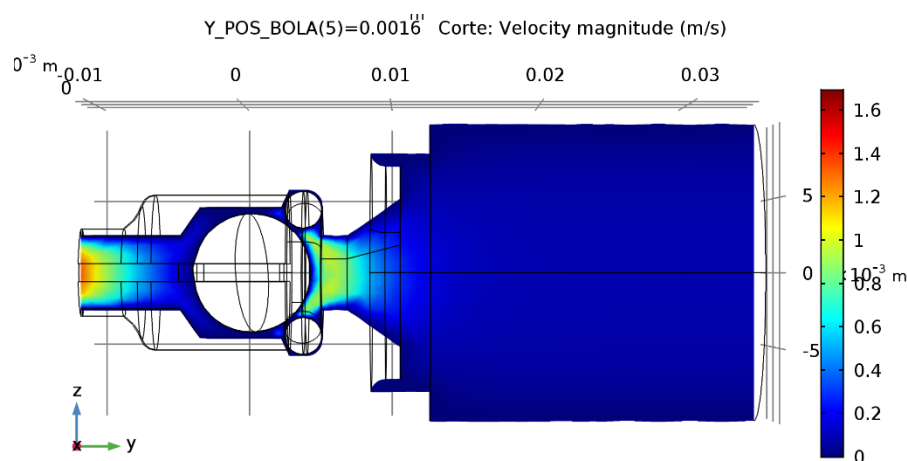


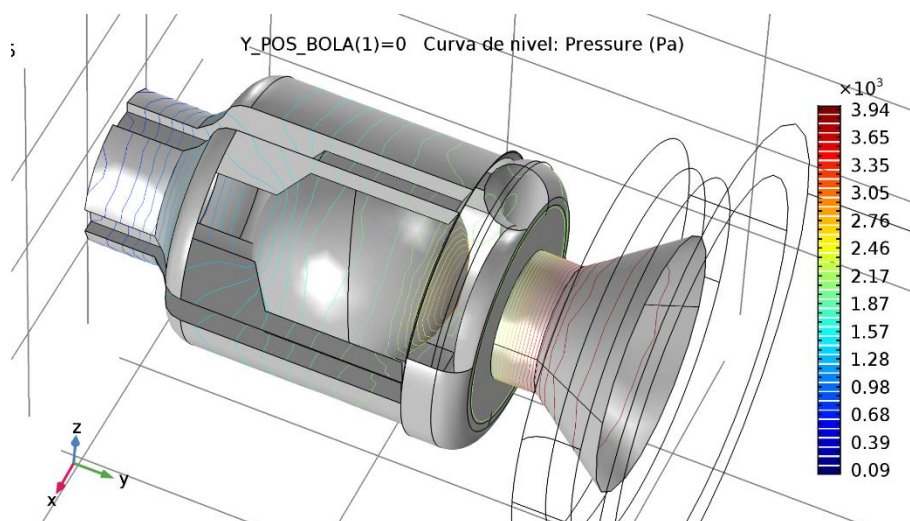
Ilustración 145 – Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 150– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=4000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 149– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=4000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 148 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=4000 Pa (Fuente: propia)

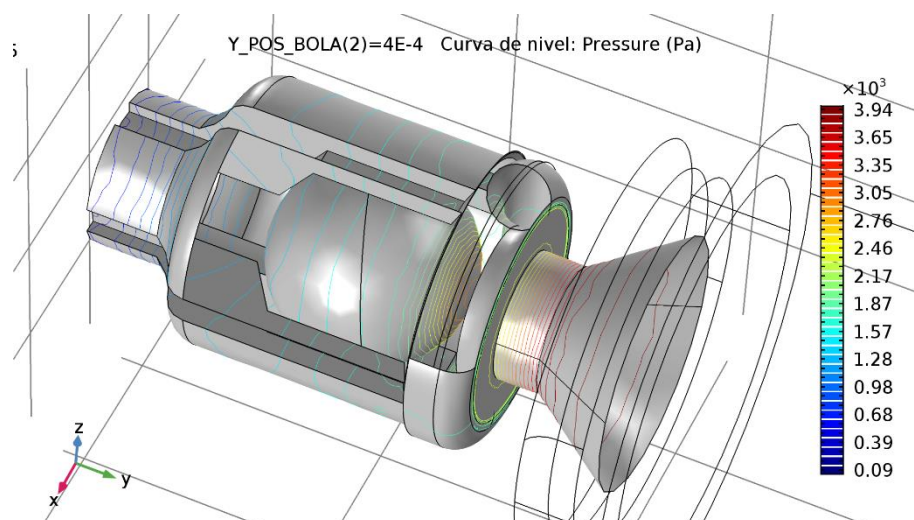


Ilustración 153– P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)

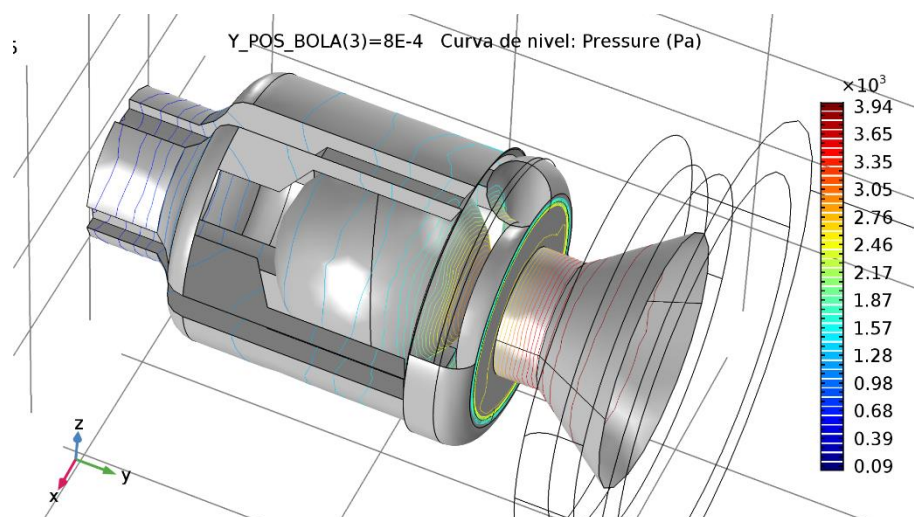


Ilustración 152 – P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)

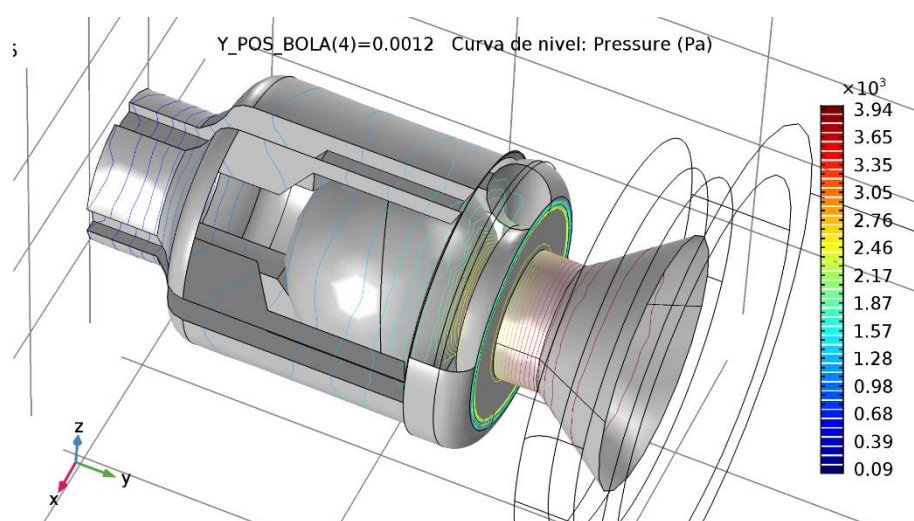


Ilustración 151 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=4000 Pa (Fuente: propia)

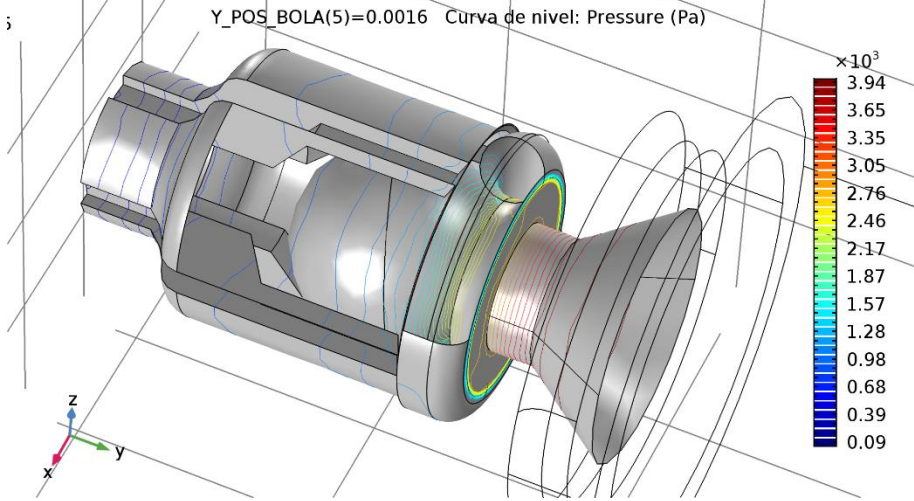


Ilustración 155- P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=4000 Pa (Fuente: propia)

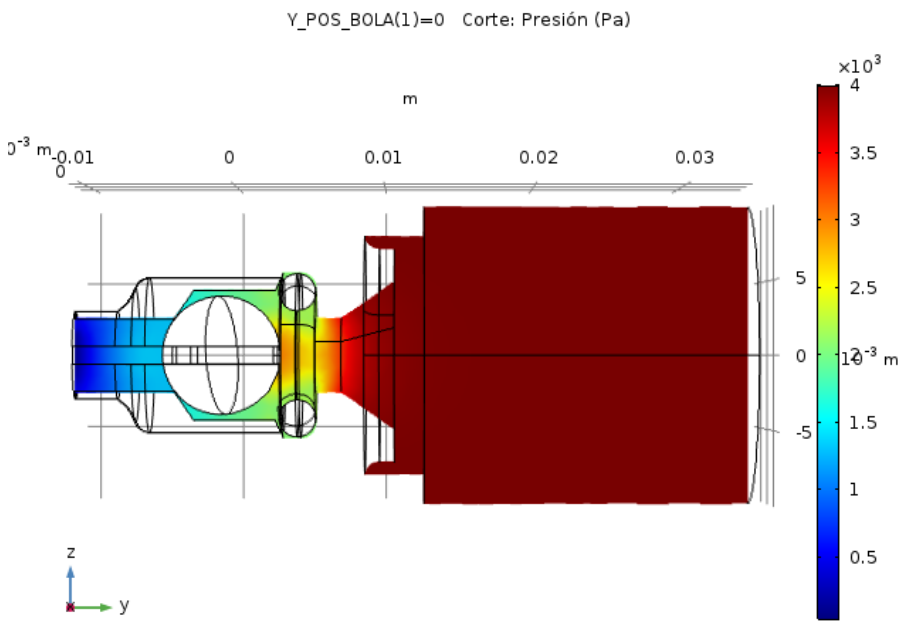


Ilustración 154 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=4000 Pa (Fuente: propia)

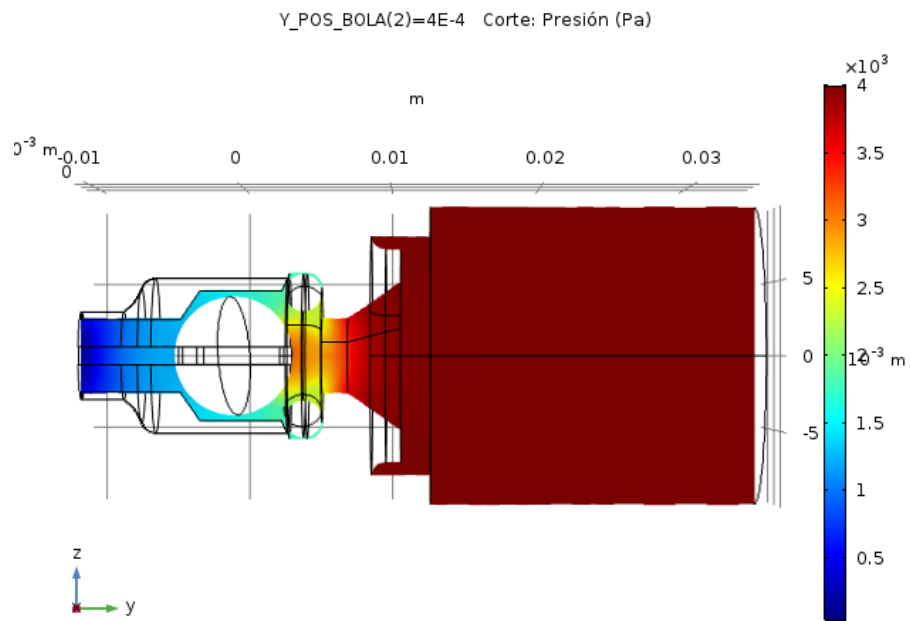


Ilustración 157– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)

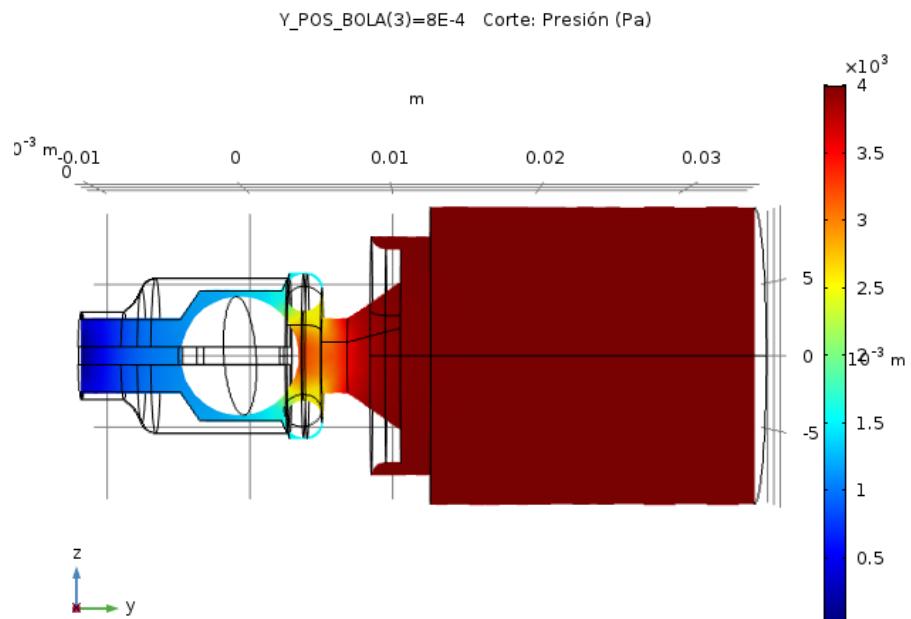
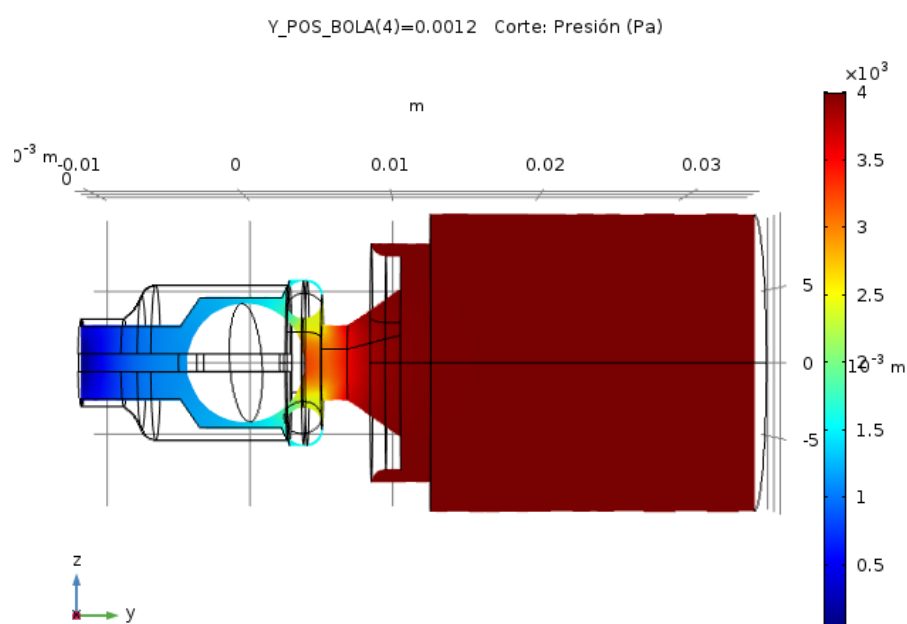
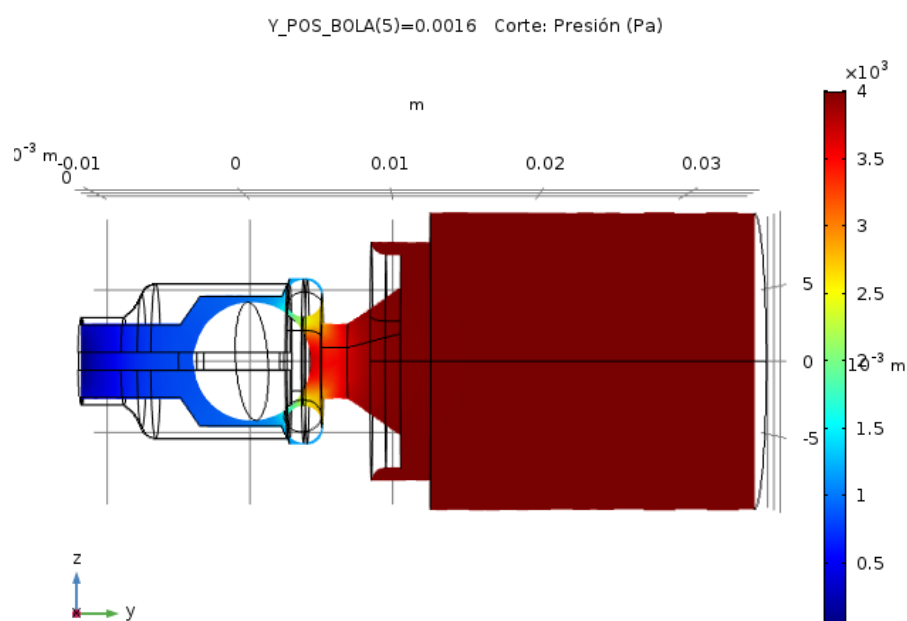


Ilustración 156– P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=4000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 158 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=4000 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 159 – P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=4000 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 4125 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,077638049	0,962433787
4,00E-04	0,073526061	0,913674472
8,00E-04	0,068466452	0,849548324
0,0012	0,069609257	0,864025076
0,0016	0,06013573	0,746082709

Tabla 41 – U0 IN – OUT P=4125 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	4124,92394	377,7116109
4,00E-04	4124,931724	345,9679453
8,00E-04	4124,941102	275,7611216
0,0012	4124,939764	293,9797574
0,0016	4124,954996	202,6167249

Tabla 40 – P IN – OUT P=4125 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2.415334889E-05	2.453014442E-05
4.00E-04	2.287410142E-05	2.328738566E-05
8.00E-04	2.130004722E-05	2.165296291E-05
0.0012	2.165557596E-05	2.202194081E-05
0.0016	1.870834323E-05	1.901587085E-05

Tabla 39 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=4125 Pa (Fuente: propia)

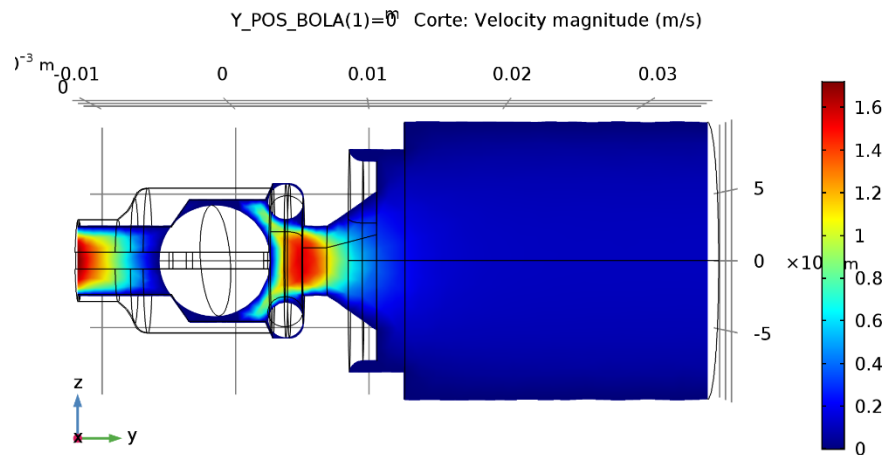
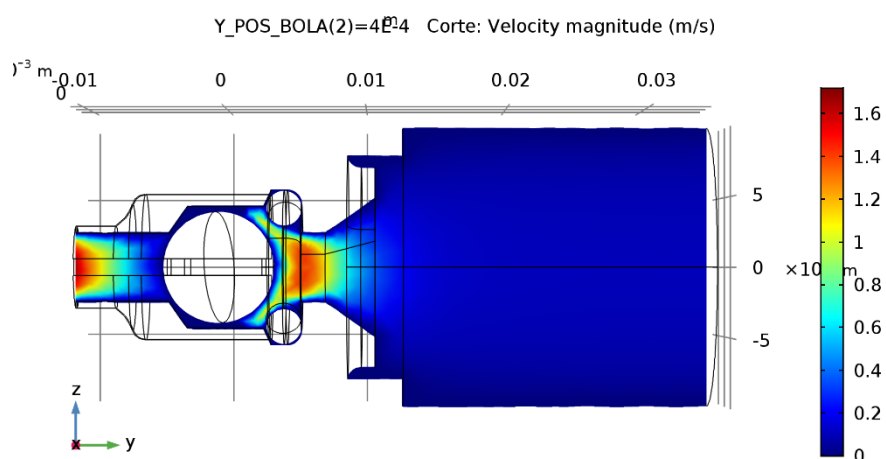
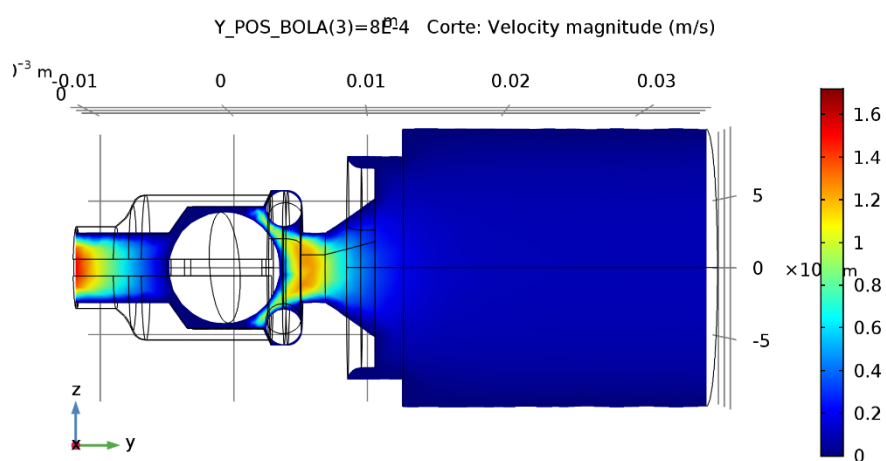


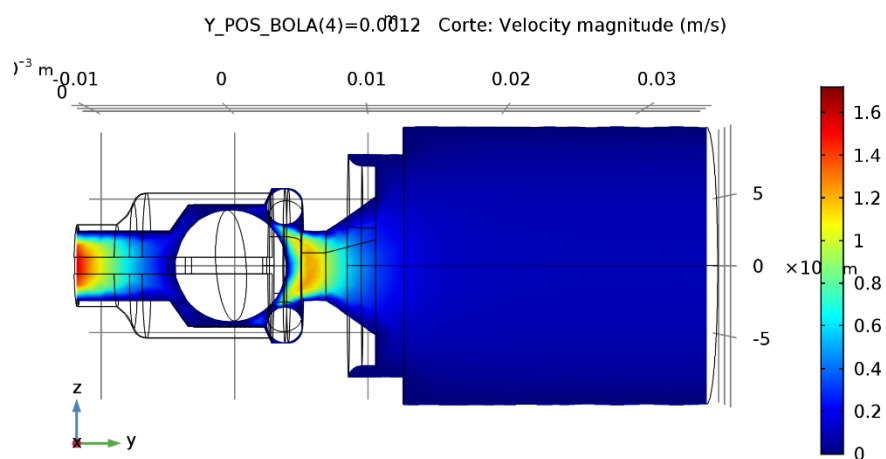
Ilustración 160 – Corte U0 Y_POS_BOLA=0 P=4125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 163– Corte U0 Y_POS_BOLA=4E-4 P=4125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 162– Corte U0 Y_POS_BOLA=8E-4 P=4125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 161– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=4125 Pa (Fuente: propia)

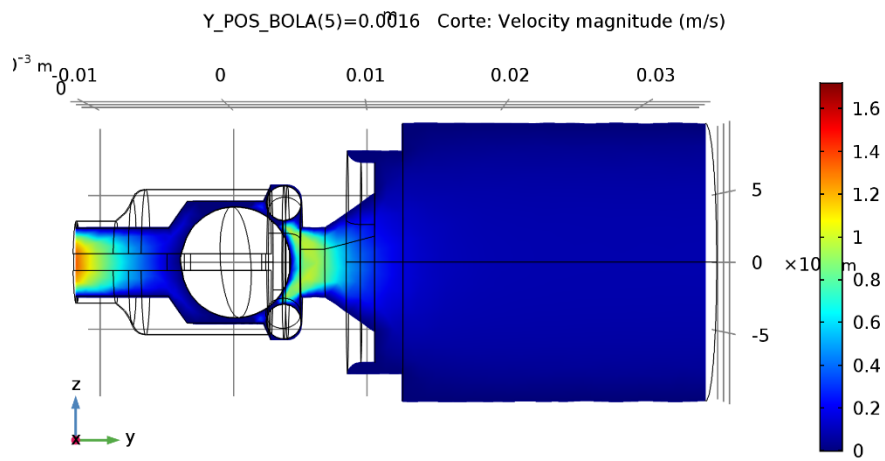


Ilustración 166– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=4125 Pa (Fuente: propia)

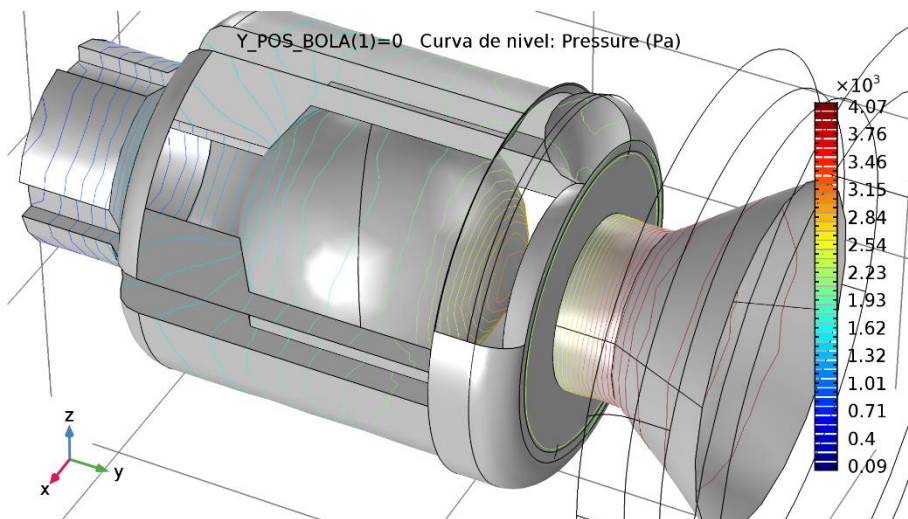


Ilustración 165 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=4125 Pa (Fuente: propia)

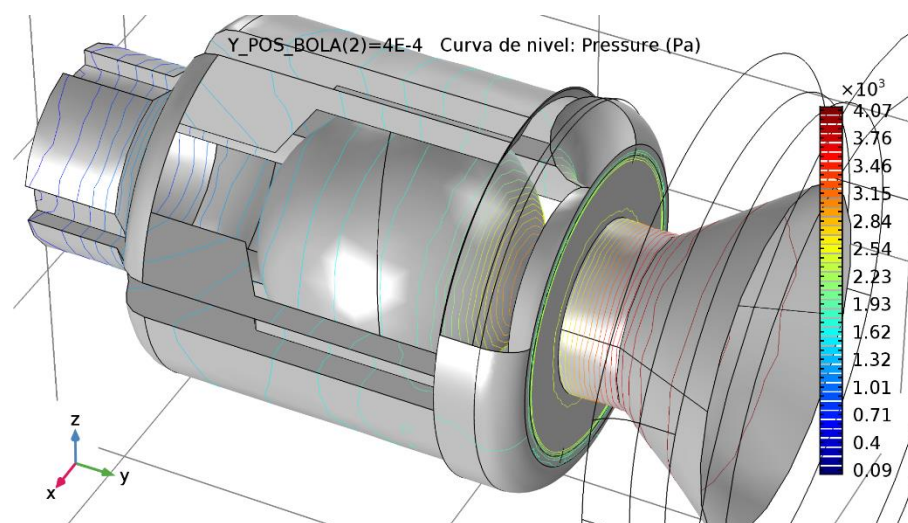
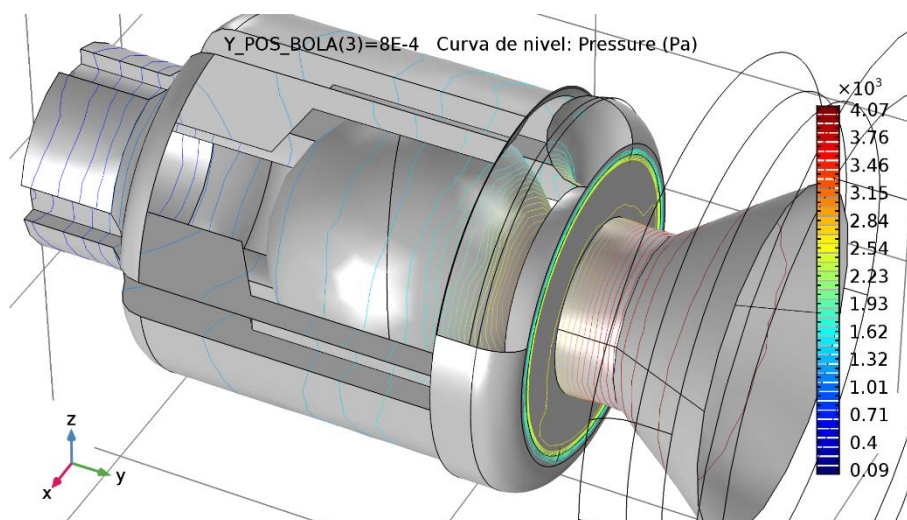
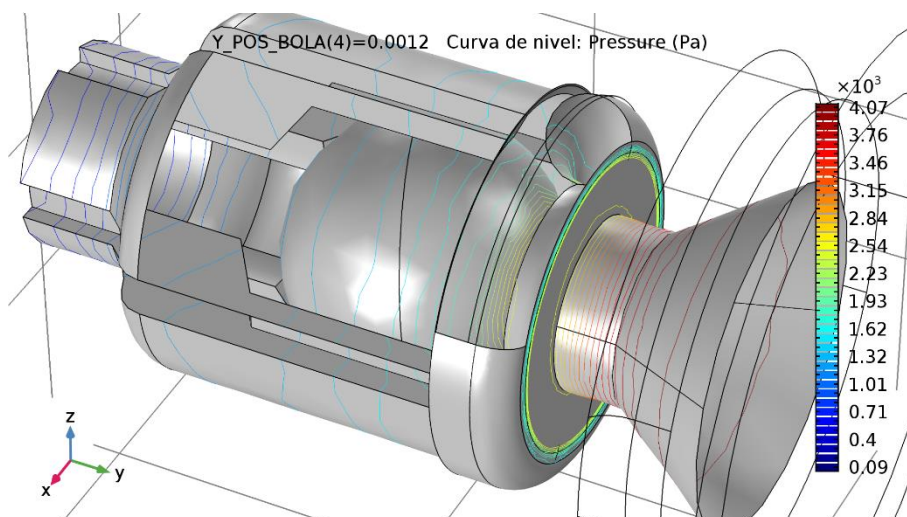


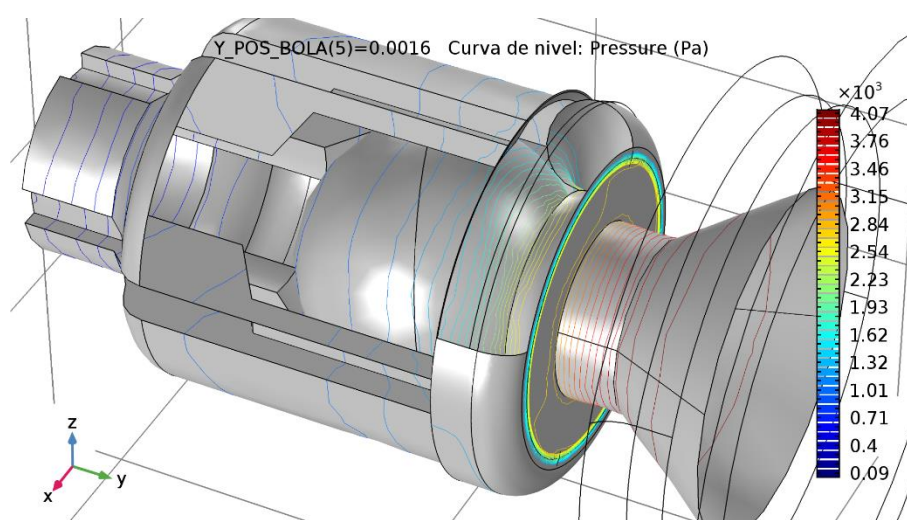
Ilustración 164– P lineal Y_POS_BOLA=4E-4 P=4125 Pa (Fuente: propia)



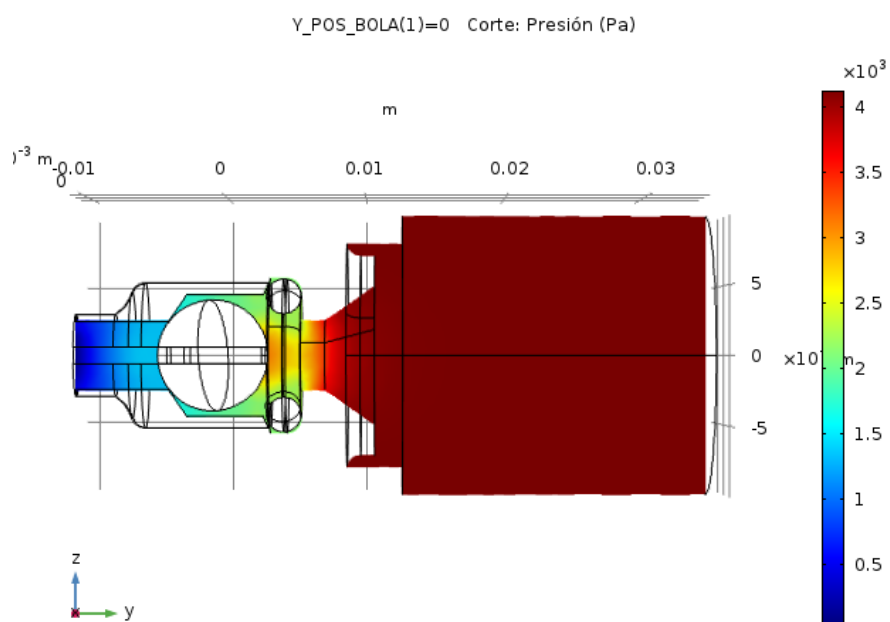
Il·lustració 167– P lineal Y_POS_BOLA=8E-4 P=4125 Pa (Fuente: propia)



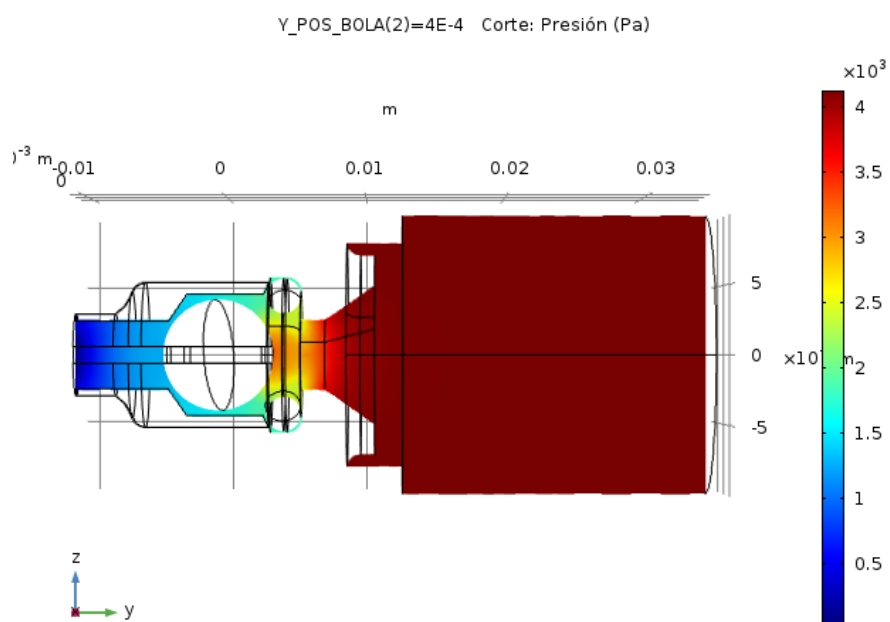
Il·lustració 168 – P lineal Y_POS_BOLA=0.0012 P=4125 Pa (Fuente: propia)



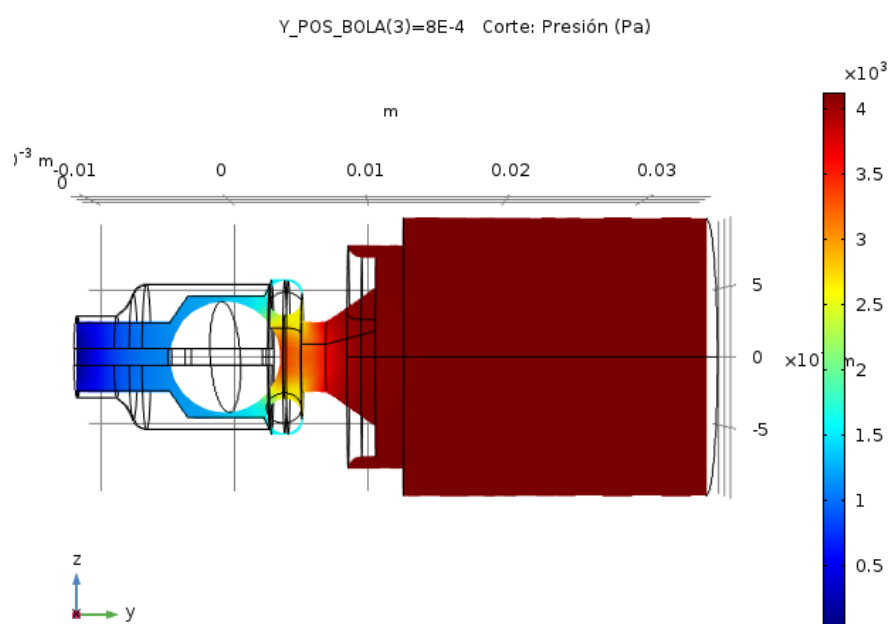
Il·lustració 169– P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=4125 Pa (Fuente: propia)



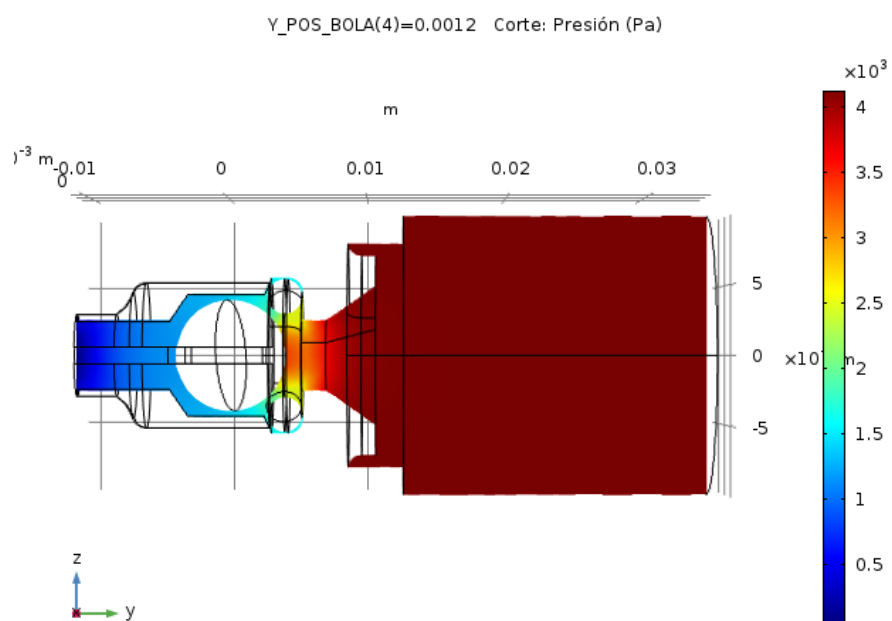
Il·lustració 171 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=4125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 170– P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=4125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 173– P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=4125 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 172– P YZ Y_POS_BOLA=0.0012 P=4125 Pa (Fuente: propia)

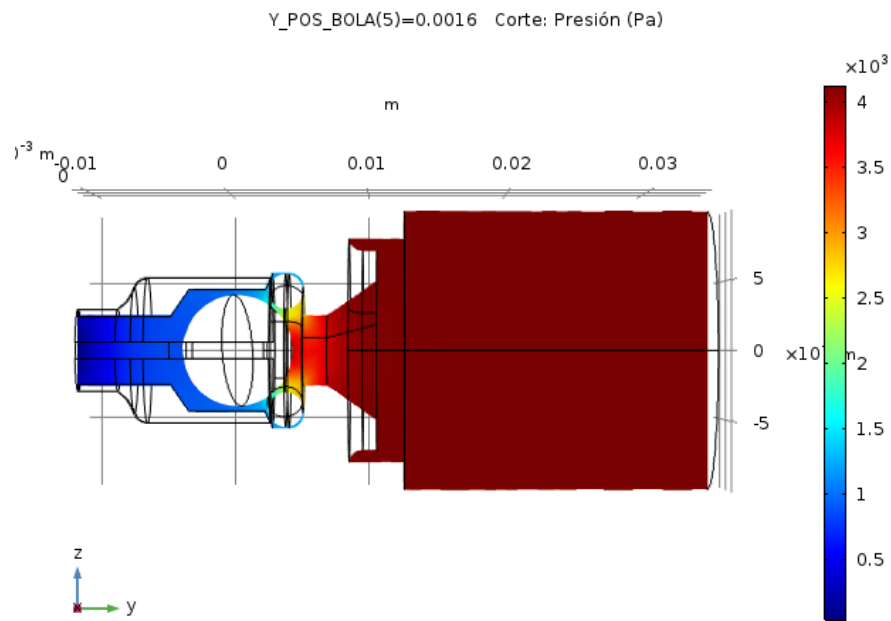


Ilustración 174– P YZ Y_POS_BOLA=0.0016 P=4125 Pa (Fuente: propia)

- Output P = 4250 Pa:

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
0	0,078825826	0,977274737
4,00E-04	0,074653618	0,927819329
8,00E-04	0,06952337	0,862778234
0,0012	0,070722051	0,877955325
0,0016	0,061166023	0,758975713

Tabla 44 – U0 IN – OUT P=4250 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Pressure (Pa)	Pressure (Pa)
0	4249,921578	391,6463917
4,00E-04	4249,929595	358,8092715
8,00E-04	4249,939245	285,9915888
0,0012	4249,937794	305,2672929
0,0016	4249,953422	210,9911153

Tabla 43 – P IN – OUT P=4250 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Velocity magnitude (m ³ /s)	Velocity magnitude (m ³ /s)
0	2,452286848E-05	2,490840489E-05
4,00E-04	2,322488644E-05	2,364790434E-05
8,00E-04	2,162885649E-05	2,199016180E-05
0,0012	2,200176839E-05	2,237698968E-05
0,0016	1,902886934E-05	1,934448281E-05

Tabla 42 – Caudal Volumétrico IN – OUT P=4250 Pa (Fuente: propia)



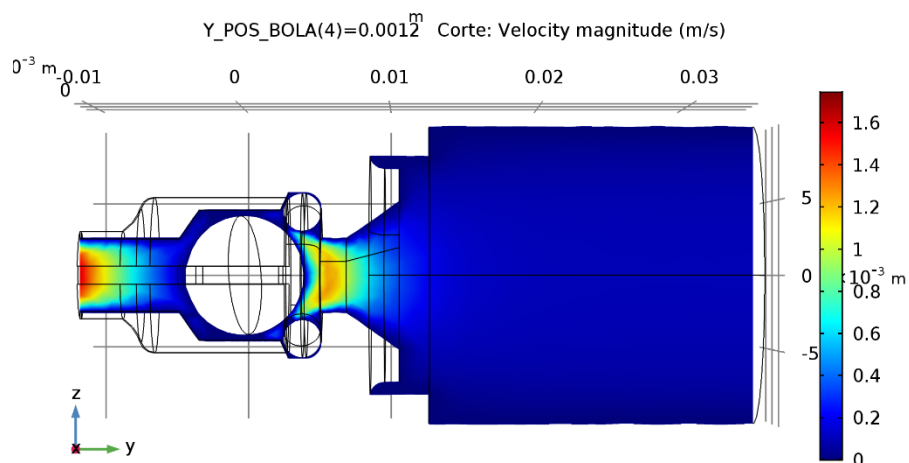


Ilustración 180– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0012 P=4250 Pa (Fuente: propia)

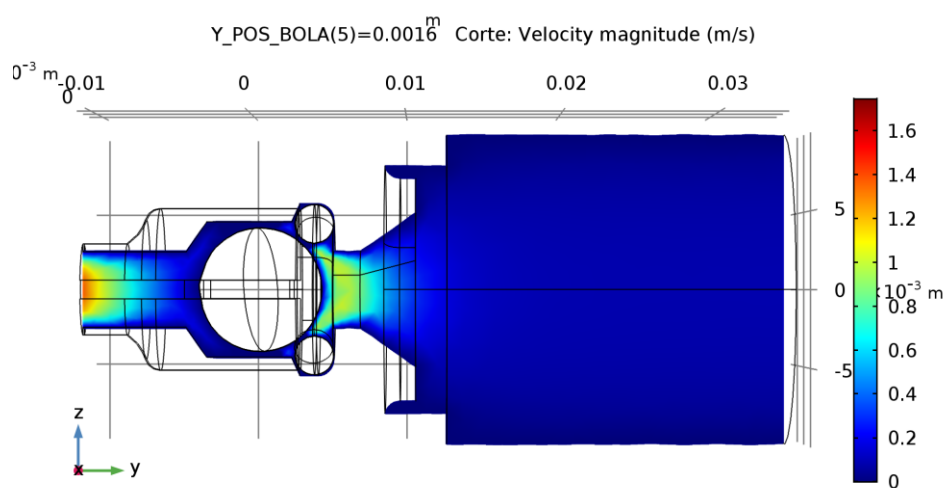


Ilustración 179– Corte U0 Y_POS_BOLA=0.0016 P=4250 Pa (Fuente: propia)

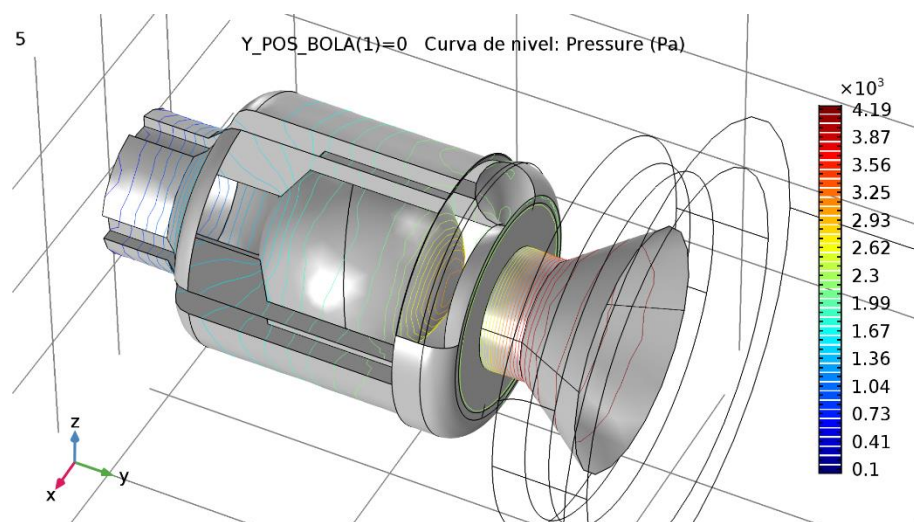
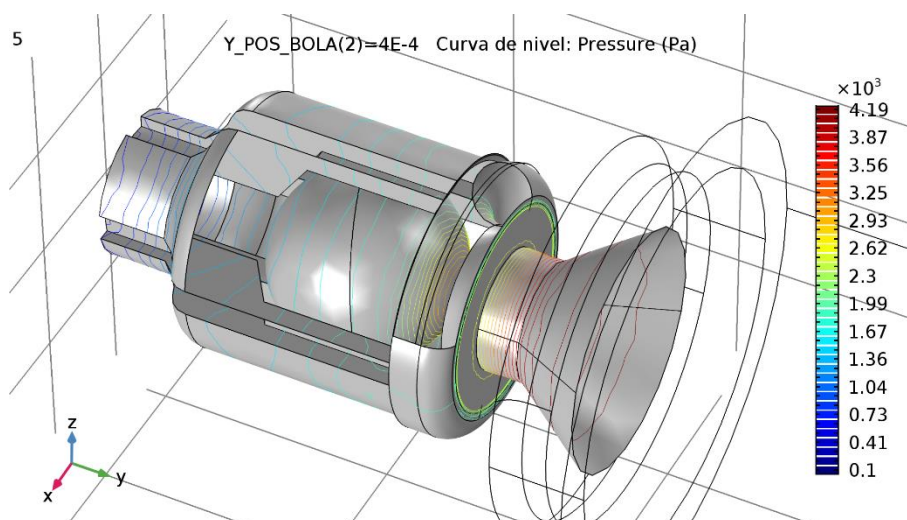
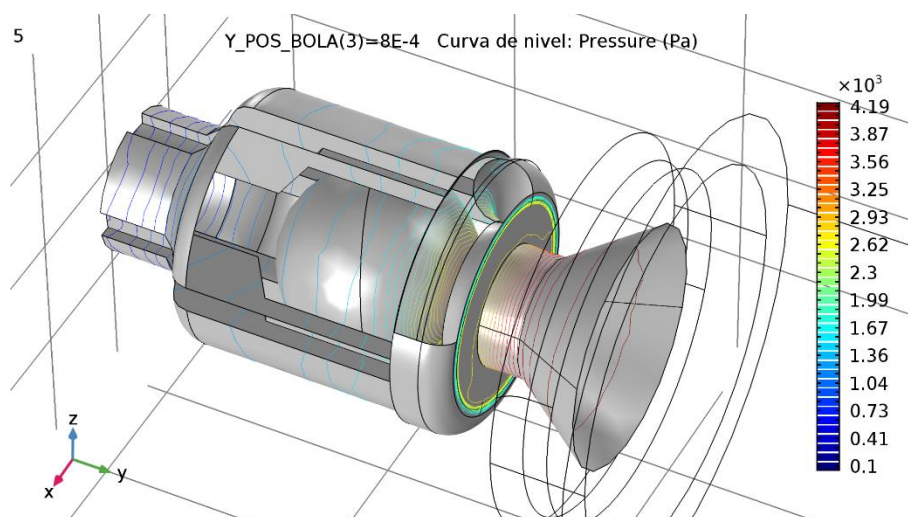


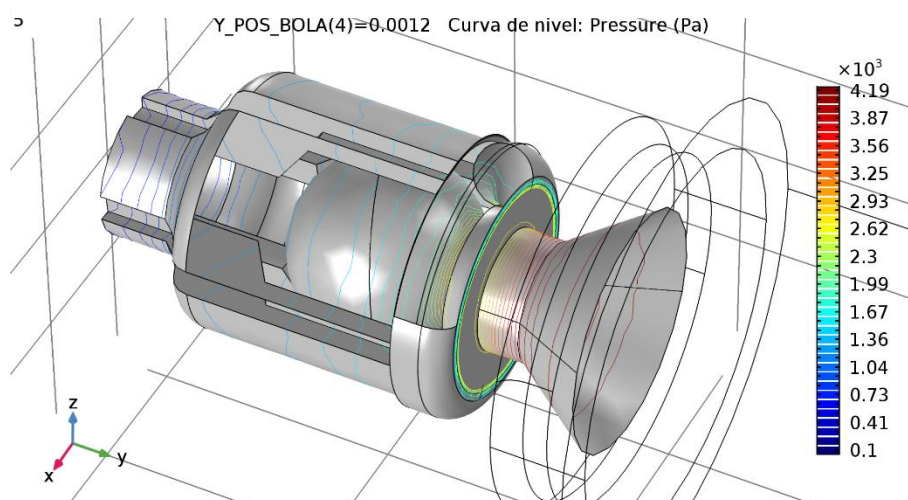
Ilustración 178 – P lineal Y_POS_BOLA=0 P=4250 Pa (Fuente: propia)



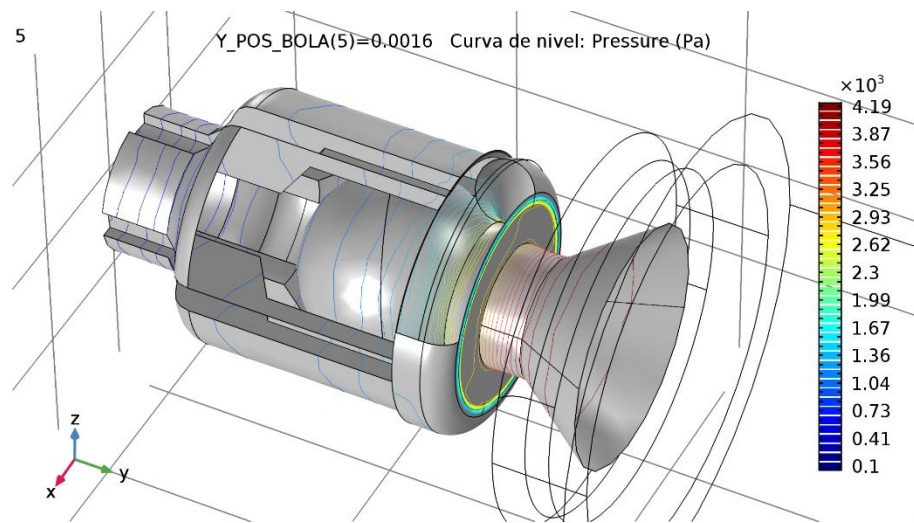
Il·lustració 183– P lineal $Y_POS_BOLA=4E-4$ $P=4250$ Pa (Fuente: propia)



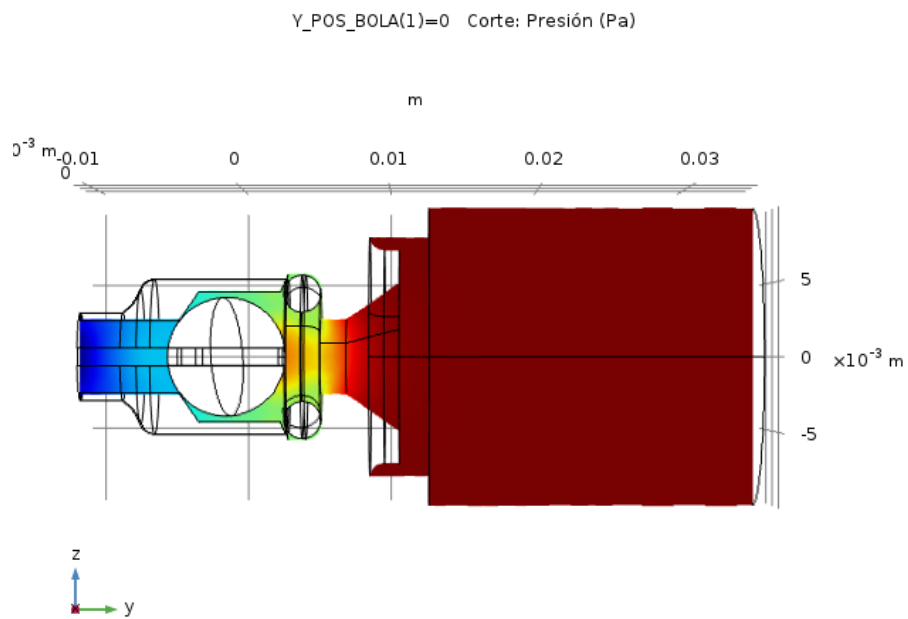
Il·lustració 182– P lineal $Y_POS_BOLA=8E-4$ $P=4250$ Pa (Fuente: propia)



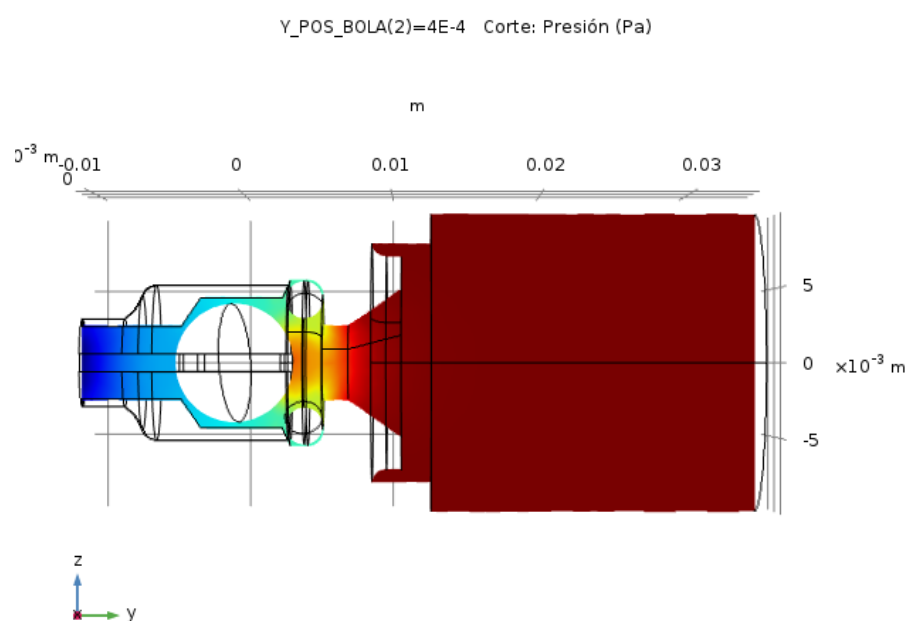
Il·lustració 181– P lineal $Y_POS_BOLA=0.0012$ $P=4250$ Pa (Fuente: propia)



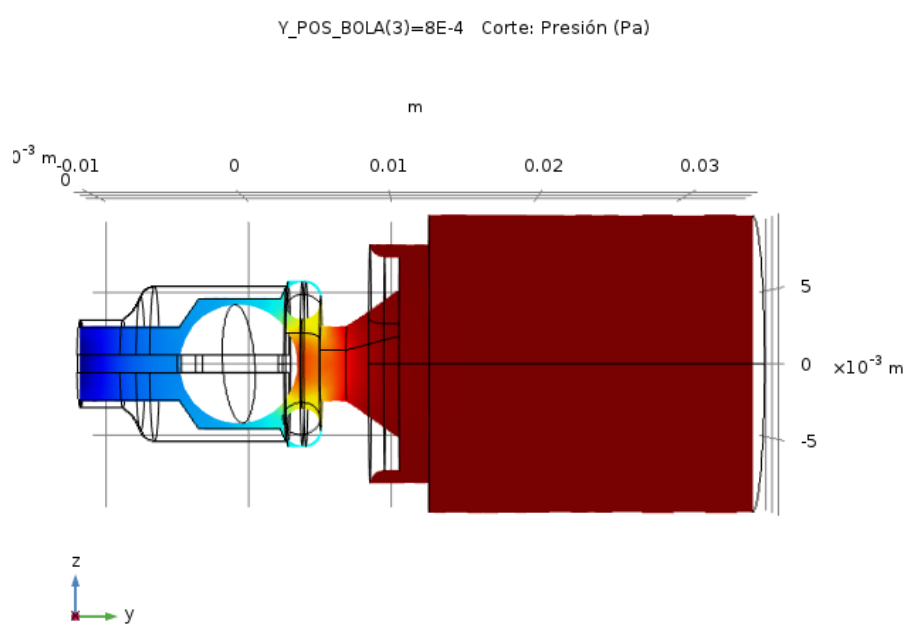
Il·lustració 185– P lineal Y_POS_BOLA=0.0016 P=4250 Pa (Fuente: propia)



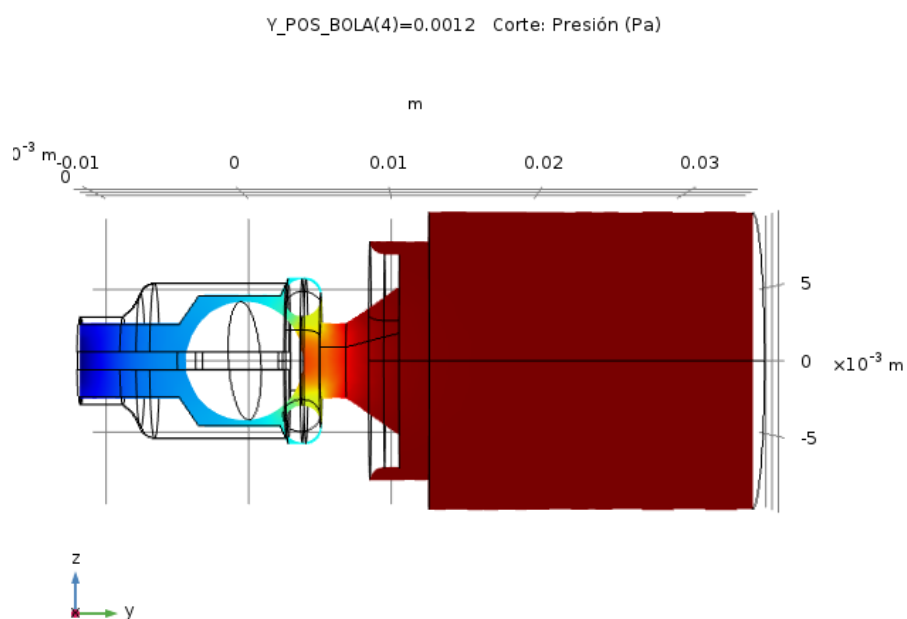
Il·lustració 184 – P YZ Y_POS_BOLA=0 P=4250 Pa (Fuente: propia)



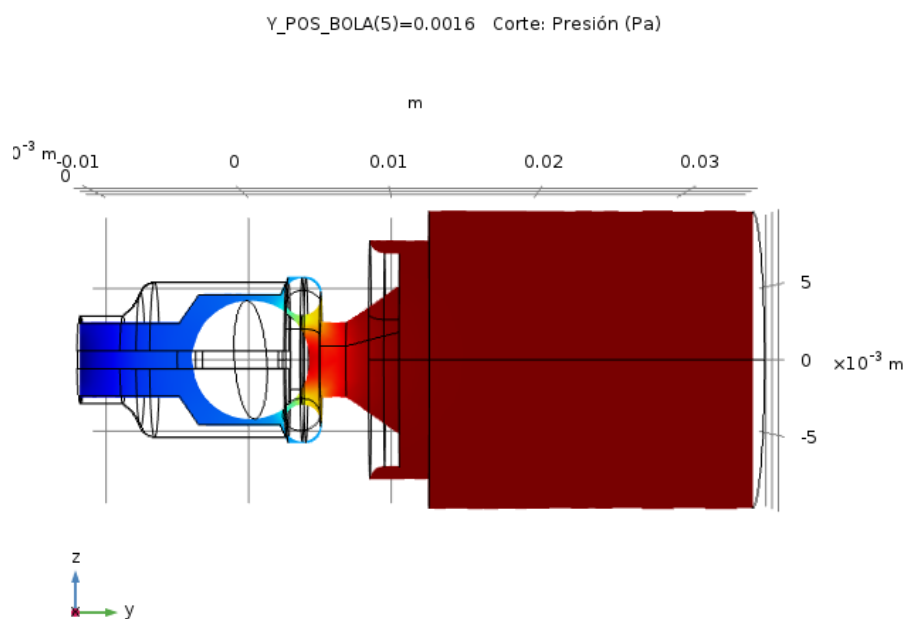
Il·lustració 187 – P YZ Y_POS_BOLA=4E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 186 – P YZ Y_POS_BOLA=8E-4 P=4250 Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 189 – P YZ $Y_POS_BOLA=0.0012$ $P=4250$ Pa (Fuente: propia)



Il·lustració 188 – P YZ $Y_POS_BOLA=0.0016$ $P=4250$ Pa (Fuente: propia)

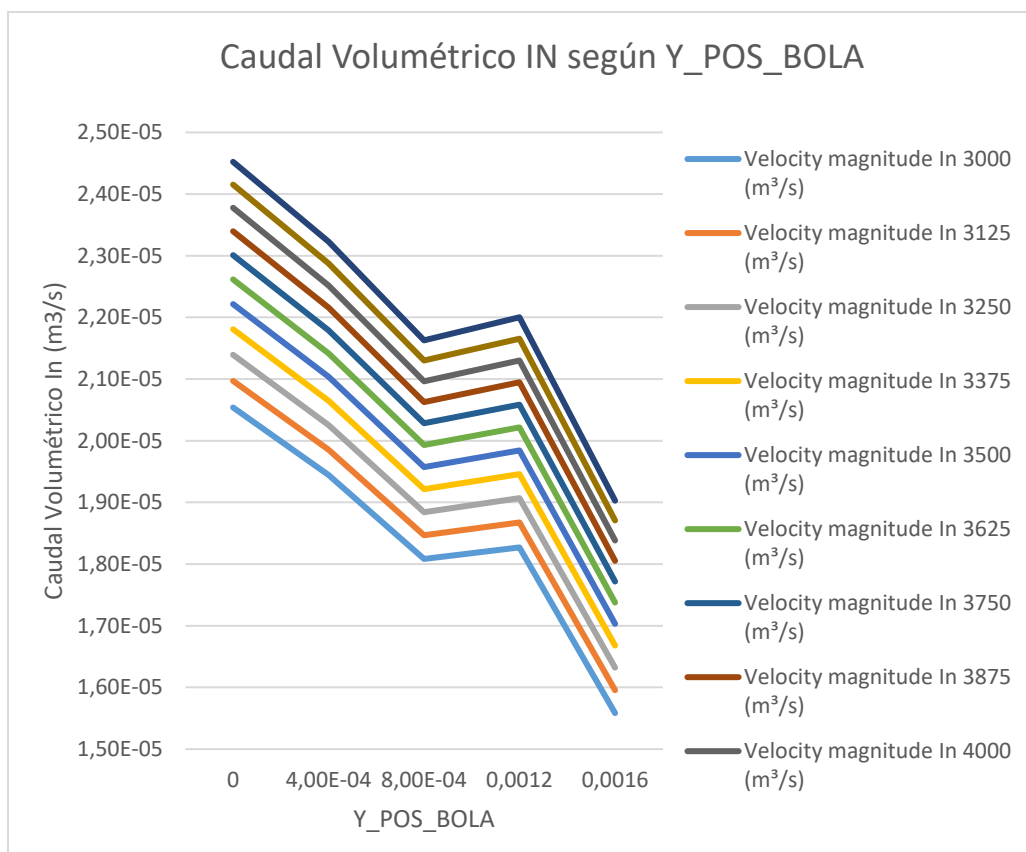


Gráfico 14 – Caudal Volumétrico OUT según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)

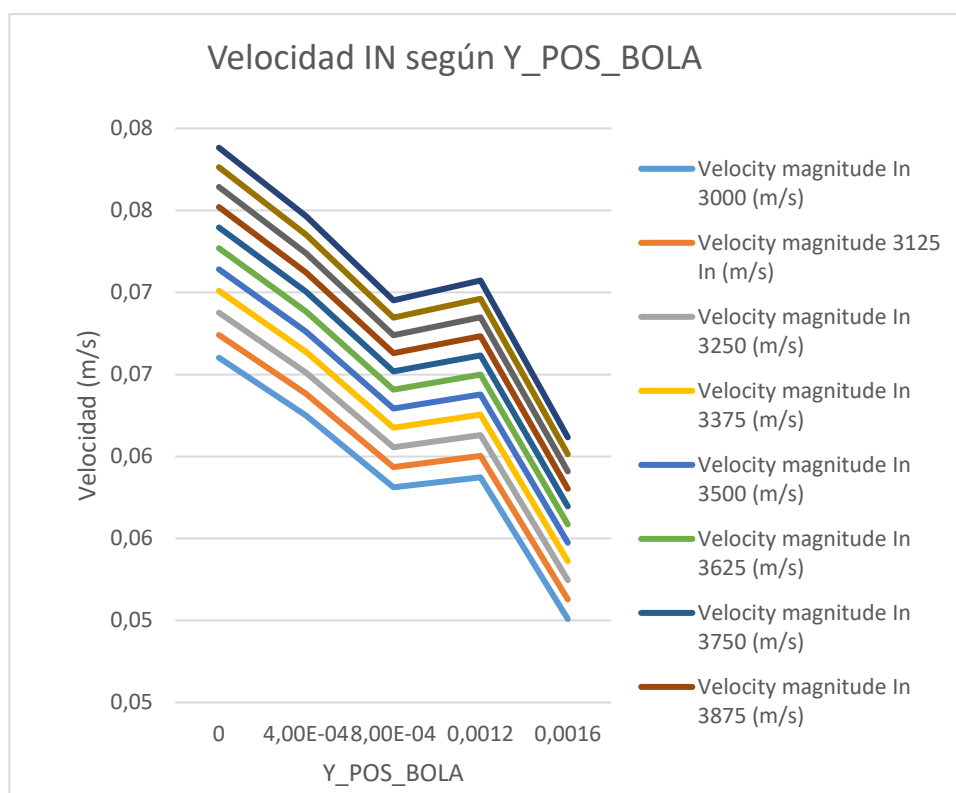


Gráfico 15 – Velocidad IN según Y_POS_BOLA (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3000	Reynolds Out 3000
0	1320,4	4087,1
4,00E-04	1249,9	3877,3
8,00E-04	1162,5	3601,2
0,0012	1174,6	3640,0
0,0016	1001,8	3102,6

Tabla 50 – Reynolds IN - OUT P=3000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3125	Reynolds Out 3125
0	1348,2	4173,6
4,00E-04	1276,3	3959,8
8,00E-04	1187,2	3678,3
0,0012	1200,6	3721,1
0,0016	1025,7	3177,3

Tabla 49 – Reynolds IN - OUT P= 3125 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3250	Reynolds Out 3250
0	1375,4	4258,4
4,00E-04	1302,1	4040,6
8,00E-04	1211,4	3753,9
0,0012	1226,1	3800,6
0,0016	1049,2	3250,6

Tabla 48 – Reynolds IN - OUT P= 3250 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3375	Reynolds Out 3375
0	1402,0	4341,6
4,00E-04	1327,4	4119,9
8,00E-04	1235,2	3828,1
0,0012	1251,0	3878,7
0,0016	1072,2	3322,6

Tabla 47 – Reynolds IN - OUT P= 3375 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3500	Reynolds Out 3500
0	1428,2	4423,3
4,00E-04	1352,3	4197,8
8,00E-04	1258,5	3901,0
0,0012	1275,6	3955,3
0,0016	1094,9	3393,3

Tabla 46 – Reynolds IN - OUT P= 3500 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3625	Reynolds Out 3625
0	1454,0	4503,7
4,00E-04	1376,7	4274,4
8,00E-04	1281,4	3972,7
0,0012	1299,6	4030,6
0,0016	1117,1	3462,9

Tabla 45 – Reynolds IN - OUT P=3625 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3750	Reynolds Out 3750
0	1479,3	4582,6
4,00E-04	1400,8	4349,6
8,00E-04	1303,9	4043,1
0,0012	1323,3	4104,8
0,0016	1139,0	3531,3

Tabla 55 – Reynolds IN - OUT P= 3750 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 3875	Reynolds Out 3875
0	1504,1	4660,3
4,00E-04	1424,4	4423,7
8,00E-04	1326,1	4112,4
0,0012	1346,7	4177,7
0,0016	1160,6	3598,7

Tabla 54 – Reynolds IN - OUT P= 3875 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 4000	Reynolds Out 4000
0	1528,6	4736,8
4,00E-04	1447,6	4496,6
8,00E-04	1347,9	4180,6
0,0012	1369,6	4249,4
0,0016	1181,8	3665,0

Tabla 53 – Reynolds IN - OUT P= 4000 Pa (Fuente: propia)

Y_POS_BOLA	Reynolds In 4125	Reynolds Out 4125
0	1552,8	4812,2
4,00E-04	1470,5	4568,4
8,00E-04	1369,3	4247,7
0,0012	1392,2	4320,1
0,0016	1202,7	3730,4

Tabla 52 – Reynolds IN - OUT P= 4125 Pa (Fuente: propia)

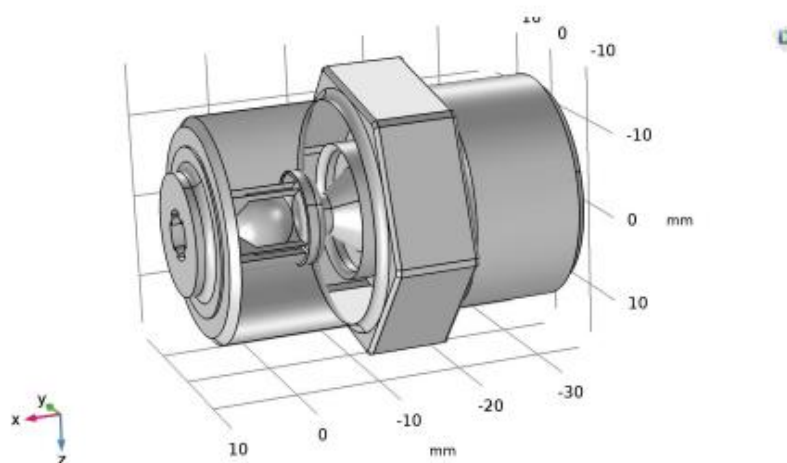
Y_POS_BOLA	Reynolds In 4250	Reynolds Out 4250
0	1576,5	4886,4
4,00E-04	1493,1	4639,1
8,00E-04	1390,5	4313,9
0,0012	1414,4	4389,8
0,0016	1223,3	3794,9

Tabla 51 – Reynolds IN - OUT P= 4250 Pa (Fuente: propia)

Anexo D – Guía aplicación COMSOL



Guía para aplicación en COMSOL. Estudio de válvula dosificadora en régimen laminar





Contenido

1.- Apartados	3
1.1.- Sincronización	3
1.2.- Parámetros	3
1.3.- Gráficos	4
1.4.- Pestaña Principal	4
1.5.- Botón Archivo	5
2.- ¿Cómo llevar a cabo un cálculo completo?	5
2.1.- Apertura del archivo	5
2.2.- Importación CAD	5
2.3.- Configuración parámetros	5
2.4.- Mallado	5
2.5.- Cálculo	6
2.6.- Extracción de resultados	6
2.7.- Instrucciones para el uso del ratón	6
2.8.- Guardado del procedimiento	6
3.- Datos de relevancia	7





1.- Apartados

1.1.- Sincronización

En ésta primera sección de la aplicación para COMSOL podemos navegar hasta el archivo llamado *Ensamblaje.SLDASM* para posteriormente importarlo y así poder gestionar nuestra geometría más adelante.

1.2.- Parámetros

En la sección de parámetros se dispone de una serie de ítems capaces de variar la geometría y las condiciones de contorno del estudio. Dichos parámetros afectan a las partes de la geometría siguientes:

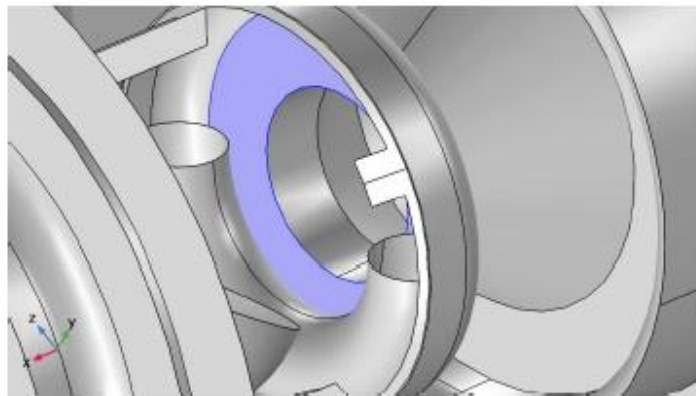


Imagen 1.- RAD_ANILLO

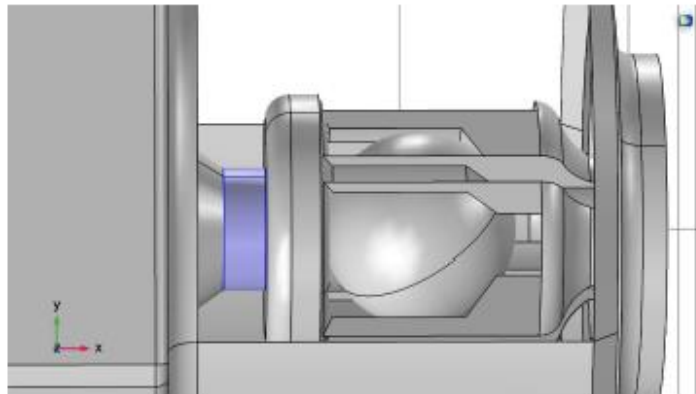


Imagen 2.- LONG_RAD_ANILLO

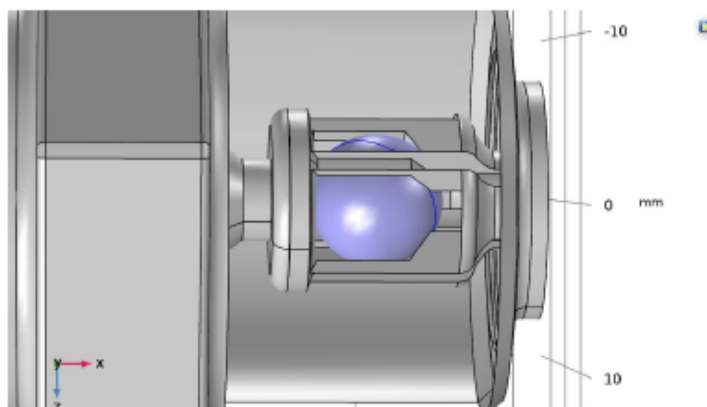


Imagen 3.- RAD_BOLA

A parte de las características geométricas mostradas previamente, existen otras características que es posible variar. Entre ellas la presión a la entrada de la válvula y la presión externa.

1.3.- Gráficos

En ésta serie de pestañas se encuentran todas las fases del estudio que involucran la geometría. Dichas secciones son: la geometría de la pieza, la malla del dominio del flujo, los resultados referentes a velocidad y presión a lo largo de todo el recorrido del flujo y sus correspondientes tablas de valores a entrada y salida de la válvula. Dichos datos pueden ser exportados como imagen o texto según el tipo de resultado. Esto facilita su posterior manipulación para llevar a cabo consiguientes estudios o informes.

1.4.- Pestaña Principal

Dicha pestaña incorpora una selección de botones de suma importancia.

- Actualizar Geometría: Una vez seleccionados los parámetros deseados, accionar éste botón para ver la actualización de la geometría en la pestaña *Geometría* dentro del área de Gráficos.
- Malla: Con un submenú donde escoger entre dos tamaños de malla, éste botón permite al programa llevar a cabo el cálculo de la malla seleccionada. Este proceso toma unos segundos. Una vez finalizada la carga, visible en la *Barra de Carga*, se podrá inspeccionar la malla en la pestaña de *Malla* dentro de área de gráficos.
- Calcular: Ya seleccionados los parámetros y el tamaño de malla, clicando este botón comenzará el cálculo. A menor tamaño de malla mayor tiempo de cálculo. Las aproximaciones de tiempo están plasmadas en el programa según el tamaño de malla seleccionado. La *Barra de Carga* marcará el avance del cálculo. Al accionar la cruzeta roja se cancelará el cálculo.



- Actualizar resultados: Una vez el cálculo haya finalizado se mostrarán en las pestañas *Velocidad XY*, *Velocidad YZ* y *Presión* los resultados gráficos generados. Es conveniente presionar este botón para no confundir los resultados actuales con resultados de anteriores cálculos.

- Actualizar Tablas: Procedimiento idéntico al botón descrito anteriormente con la diferencia de que este botón se encarga de refrescar las tablas *Tabla Velocidad In/Out*, *Presión In/Out*, *Tabla Caudal Volumétrico In/Out*. Dichas tablas se pueden copiar o exportar para su manipulación en Excel.

1.5.- Botón Archivo

En dicho botón se encuentran las acciones de *Guardar* y *Guardar Como*. Acción recomendable a llevar a cabo con diferentes nombre si se quiere hacer un estudio con diferentes parámetros y se desea guardar todos los archivos para su posterior post-proceso.

2.- ¿Cómo llevar a cabo un cálculo completo?

2.1.- Apertura del archivo

Abrir el archivo *Ensamblaje.SLDASM* en SolidWorks. Abrir una sesión de COMSOL en blanco e ir a *Archivo > Ejecutar la aplicación*. Navegar hasta el archivo *Estudio_Válvula_R_Lam.mph* y ejecutarlo.

2.2.- Importación CAD

Una vez la aplicación esté completamente abierta. Dirigirse a la sección *1.-Sincronización* y navegar de nuevo hasta la localización de archivo *Ensamblaje.SLDASM*. Hacer clic en el botón *Sincronizar*.

2.3.- Configuración parámetros

Con el CAD ya sincronizado, procedemos a imputar los parámetros deseados en las casillas correspondientes de la sección *2.- Parámetros*. Poner especial atención en no exceder el valor de 2300 en Reynolds ya que éste estudio está pensado para trabajos a régimen laminar, no a régimen turbulento, y esto generaría resultados divergentes de la realidad. Una vez se han imputado los valores deseados en los parámetros, hacer clic en el botón *Actualizar Geometría* para apreciar cómo se adaptan las formas de la válvula a éstos parámetros.

2.4.- Mallado

Hacer clic en el botón *Malla*. En el menú desplegable que aparece debajo, seleccionar entre los dos tamaños de malla disponibles para llevar a cabo el cálculo. Estos son: *Malla Fina* y *Malla más Fina*. Una vez finalizado el tiempo de carga observable en la *Barra de Progreso* situada en la parte inferior derecha de la aplicación, acceder a la pestaña *Malla*





en la sección 3.- *Geometría* para poder apreciar la variación del tamaño de malla entre los dos disponibles.

2.5.- Cálculo

Una vez llevado a cabo el mallado con éxito, accionar el botón *Calcular* en la parte superior del aplicativo. Observar cómo avanza el cálculo en la *Barra de Progreso*. El tiempo estimado de cómputo se indica en la parte inferior de la sección 2.- *Parámetros*. El cálculo puede ser cancelado en cualquier momento pulsando la cruceta situada a la izquierda de la *Barra de Progreso*.

2.6- Extracción de resultados

Al finalizar el cálculo se podrá obtener los resultados tanto gráficos como tabulados en las pestañas siguientes a la pestaña *Malla*. Para asegurarse que dichos resultados reflejan lo anteriormente calculado, hacer clic en los botones *Actualizar resultados* y *Actualizar Tablas* para actualizar los gráficos y las tablas, respectivamente. Todos los valores e imágenes pueden ser exportados y guardados en el ordenador para su posterior tratamiento. En el caso de los gráficos, mediante el icono de la cámara de fotos. En el caso de las tablas, mediante el icono de exportación de tabla.

Para obtener las imágenes deseadas en el momento de la exportación, usar los controles deslizables ubicados en la parte inferior de los gráficos. El primer control ("*Y_POS_BOLA*") refiere a la posición de la bola dentro de la válvula. El segundo control ("*Plano*") refiere a la posición del plano estudio en la válvula. Para poder actualizar tanto la posición de la bola como la posición del plano, mover los deslizables a la posición deseada y presionar el botón *Actualizar Gráficos*, ubicado en la parte superior de la aplicación.

2.7.- Instrucciones para el uso del ratón

Para llevar a cabo el movimiento correcto de la válvula y la obtención de unas imágenes de mejor calidad se proporcionan los siguientes movimientos de ratón.

- Zoom In/Out: Clic en la rueda centra y movimiento adelante/atrás.
- Movimiento rotativo: Clic en el botón izquierdo más arrastrar.
- Movimiento lineal: Clic en el botón derecho más arrastrar.

Para volver a ajustar la válvula en el centro de la imagen pulsar el botón *Ajustar al marco* situado en la parte superior de la pantalla de gráficos.

2.8.- Guardado del procedimiento

Para poder llevar a cabo un estudio más profundo posteriormente, guardar el archivo haciendo clic en *Archivo > Guardar Como* y renombrándolo según conveniencia. Para posteriores guardados usar la opción *Guardar*.



3.- Datos de relevancia

La aplicación ha sido llevada a cabo mediante los módulos de COMSOL 5.3a siguientes:

- COMSOL Multiphysics
- CAD Import Module
- CFD Module
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®

También se ha requerido de uso del software SOLIDWORKS®.

